

# La Economía del Cambio Climático en México

**Dr. Luis Miguel Galindo**  
Coordinador





“La Economía del Cambio Climático en México” es un estudio coordinado por el Doc. Luis Miguel Galindo Paliza, de la Facultad de Economía de la Universidad Nacional Autónoma de México, a petición de las Secretarías de Hacienda y Crédito Público y de Medio Ambiente y Recursos Humanos Naturales. En él participaron el Centro Mario Molina, el Instituto Nacional de Ecología y el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México. Los recursos financieros fueron otorgados por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, la cooperación internacional el Reino Unido y del Banco Interamericano de Desarrollo. Se contó también con el apoyo técnico del Banco Mundial y de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe de la Organización de las Naciones Unidas. El enfoque, la metodología y las recomendaciones de política son responsabilidad del coordinador del estudio.

**Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales**

Subsecretaría de Planeación y Política Ambiental

Dirección General Adjunta de Análisis de Política y Financiamiento Estratégico

Blvd. Adolfo Ruíz Cortines 4209, Col. Jardines en la Montaña,

C.P. 14210, Tlalpan, México, D.F.

Impresos en México, D.F. Julio 2010

**ISBN 978-607-7908-06-7**

## **ÍNDICE**

<b>INTRODUCCIÓN GENERAL</b>	<b>17</b>
<b>PARTE 1: LA CIENCIA DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN MÉXICO</b>	<b>17</b>
<b>1.1 EL CAMBIO CLIMÁTICO: EVIDENCIA INTERNACIONAL</b>	
<b>PUNTOS FUNDAMENTALES</b>	<b>17</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>18</b>
<b>2. IMPULSORES ANTROPOGÉNICOS Y NATURALES DEL CAMBIO EN EL CLIMA</b>	<b>19</b>
<b>3. LA EVIDENCIA INTERNACIONAL</b>	<b>23</b>
<b>4. FACTORES QUE INDUCEN EL CAMBIO CLIMÁTICO</b>	<b>28</b>
<b>5. PROYECCIONES DE CAMBIOS CLIMÁTICOS FUTUROS</b>	<b>29</b>
<b>6. CONCLUSIONES</b>	<b>30</b>
<b>1.2 EL CAMBIO CLIMÁTICO EN MÉXICO: EVIDENCIA Y PROYECCIONES</b>	<b>33</b>
<b>PUNTOS FUNDAMENTALES</b>	<b>33</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>34</b>
<b>2. UNA PERSPECTIVA GLOBAL DEL CAMBIO CLIMÁTICO Y SU EXPRESIÓN REGIONAL</b>	<b>34</b>
<b>3. ESCENARIOS DE TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN PARA MÉXICO</b>	<b>37</b>
<b>4. CONCLUSIONES</b>	<b>56</b>
<b>PARTE 2: ESCENARIOS MACROECONÓMICOS</b>	<b>57</b>
<b>2.1 METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS ECONÓMICO DEL CAMBIO CLIMÁTICO</b>	<b>57</b>
<b>PUNTOS FUNDAMENTALES</b>	<b>57</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>58</b>

2. METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS ECONÓMICO DEL CAMBIO CLIMÁTICO	58
3. EVOLUCIÓN RECIENTE Y PERSPECTIVAS DE LA ECONOMÍA MEXICANA	59
3.1 LA EVIDENCIA INTERNACIONAL	59
3.2 EL CRECIMIENTO ECONÓMICO EN MÉXICO	63
3.3 ANÁLISIS SECTORIAL	64
3.4 MODELOS ECONÓMÉTRICOS PARA LA ESTIMACIÓN DE LOS ESCENARIOS ECONÓMICOS	66
3.5 ESCENARIOS BASE 2008 – 2100	67
3.6 ESCENARIOS DEMOGRÁFICOS	70
4. CONCLUSIONES	71
<b>PARTE 3: LOS IMPACTOS ECONÓMICOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN MÉXICO</b>	<b>75</b>
3.1 EL SECTOR AGROPECUARIO	75
PUNTOS FUNDAMENTALES	75
1. INTRODUCCIÓN	76
2. LOS IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL SECTOR AGROPECUARIO	76
3. IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO Y LOS MODELOS ECONÓMICOS	84
4. PRODUCCIÓN Y RENDIMIENTO DEL SECTOR AGROPECUARIO CON CAMBIO CLIMÁTICO	86
5. EL MODELO TIPO RICARDIANO	132
6. MODELOS DE RIESGO EN LAS ACTIVIDADES AGROPECUARIAS	137
6.1 MODELO DE VOLATILIDAD ASIMÉTRICA PARA EL PRODUCTO	138
6.2 VOLATILIDAD EN LOS RENDIMIENTOS AGRÍCOLAS	140

<b>7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>142</b>
<b>3.2 RECURSOS HÍDRICOS</b>	<b>145</b>
<b>PUNTOS FUNDAMENTALES</b>	<b>145</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>145</b>
<b>2. EL CONTEXTO ACTUAL DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN MÉXICO</b>	<b>146</b>
<b>2.1 PRECIPITACIÓN</b>	<b>146</b>
<b>2.2 DISPONIBILIDAD NATURAL DEL AGUA</b>	<b>147</b>
<b>3. DEMANDA DE AGUA POR SECTORES</b>	<b>148</b>
• <b>SECTOR AGROPECUARIO</b>	<b>149</b>
• <b>ABASTECIMIENTO PÚBLICO (CONSUMO HUMANO)</b>	<b>150</b>
• <b>SECTOR INDUSTRIAL</b>	<b>151</b>
<b>4. EVIDENCIA EMPÍRICA DE LA DEMANDA DE AGUA EN MÉXICO</b>	<b>152</b>
• <b>EL ABASTECIMIENTO PÚBLICO DE AGUA</b>	<b>154</b>
• <b>EL SECTOR AGROPECUARIO</b>	<b>155</b>
• <b>EL SECTOR INDUSTRIAL</b>	<b>155</b>
<b>5. PRONÓSTICO DE CONSUMO DE AGUA POR SECTORES AL 2100</b>	<b>156</b>
• <b>ABASTECIMIENTO PÚBLICO</b>	<b>157</b>
• <b>SECTOR AGROPECUARIO</b>	<b>157</b>
• <b>SECTOR INDUSTRIAL</b>	<b>158</b>
<b>6. IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN MÉXICO</b>	<b>159</b>
<b>7. UNA APROXIMACIÓN A LOS COSTOS DEL AGUA</b>	<b>173</b>

<b>7.1 COSTOS ASOCIADOS AL CAMBIO CLIMÁTICO</b>	<b>173</b>
• <b>COSTOS DE ABASTECIMIENTO PÚBLICO</b>	<b>173</b>
• <b>COSTOS DEL AGUA PARA CONSUMO AGROPECUARIO</b>	<b>176</b>
• <b>COSTOS DEL CONSUMO DE AGUA PARA EL SECTOR INDUSTRIAL</b>	<b>179</b>
<b>8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>183</b>
<b>3.3 CAMBIO DE USO/COBERTURA DE SUELO</b>	<b>187</b>
<b>PUNTOS FUNDAMENTALES</b>	<b>187</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>188</b>
<b>2. DEFINICIÓN DE UNA LÍNEA BASE DE CAMBIO DE USO DE SUELO</b>	<b>189</b>
<b>3. MODELO DE PROYECCIÓN DE USO DEL SUELO</b>	<b>191</b>
<b>4. ESTIMACIÓN DEL EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO</b>	<b>197</b>
<b>5. PROYECCIÓN DE ESCENARIOS DE LA COBERTURA DE DIFERENTES FORMACIONES CON CAMBIO CLIMÁTICO</b>	<b>198</b>
<b>6. ESTIMACIÓN DE COSTOS Y BENEFICIOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO</b>	<b>204</b>
<b>7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>204</b>
<b>3.4 BIODIVERSIDAD</b>	<b>215</b>
<b>PUNTOS FUNDAMENTALES</b>	<b>215</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>216</b>
<b>2. MARCO GENERAL PARA EL ANÁLISIS DE LA BIODIVERSIDAD</b>	<b>217</b>
<b>3. LOS IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA BIODIVERSIDAD</b>	<b>222</b>
<b>4. LOS IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA BIODIVERSIDAD EN MÉXICO</b>	<b>242</b>

<b>5. EL CAMBIO CLIMÁTICO Y LOS COSTOS ECONÓMICOS EN LA BIODIVERSIDAD EN MÉXICO</b>	<b>251</b>
<b>5.1 BIOPROSPECCIÓN</b>	<b>251</b>
<b>5.2 CONSERVACIÓN DE ESPECIES</b>	<b>253</b>
<b>5.3 VALOR DEL TURISMO ASOCIADO A LA BIODIVERSIDAD</b>	<b>257</b>
<b>5.4 BOSQUES</b>	<b>258</b>
<b>5.5 CAPTURA DE CARBONO</b>	<b>263</b>
<b>5.6 VALOR ESTÉTICO DE LOS BOSQUES</b>	<b>266</b>
<b>6. VALORACIONES DE LA BIODIVERSIDAD</b>	<b>267</b>
<b>7. LA BIODIVERSIDAD Y LOS IMPACTOS CLIMÁTICOS</b>	<b>269</b>
<b>8. COSTO TOTAL DE LA BIODIVERSIDAD</b>	<b>271</b>
<b>9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>273</b>
<b>3.5 EVENTOS EXTREMOS: HURACANES Y ENOS</b>	<b>276</b>
<b>PUNTOS FUNDAMENTALES</b>	<b>276</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>277</b>
<b>2. VULNERABILIDAD Y RIESGOS EN MÉXICO</b>	<b>277</b>
<b>3. ASENTAMIENTOS HUMANOS Y ACTIVIDADES ECONÓMICAS PRINCIPALES</b>	<b>279</b>
<b>4. EL NIÑO Y LA OSCILACIÓN SUR (ENOS) Y LA NIÑA</b>	<b>281</b>
<b>5. EVENTOS EXTREMOS EN LA DINÁMICA AGRÍCOLA</b>	<b>284</b>
<b>6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>285</b>
<b>3.6 TURISMO Y EVENTOS EXTREMOS</b>	<b>287</b>

<b>PUNTOS FUNDAMENTALES</b>	<b>287</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>287</b>
<b>2. EL TURISMO, EL CRECIMIENTO ECONÓMICO Y LOS DESASTRES NATURALES</b>	<b>288</b>
<b>3. MARCO GENERAL SOBRE LA DEMANDA DE TURISMO INTERNACIONAL</b>	<b>289</b>
<b>4. DEMANDA DE TURISMO INTERNACIONAL: EVIDENCIA PARA MÉXICO</b>	<b>290</b>
<b>5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>294</b>
<b>3.7 SALUD</b>	<b>296</b>
<b>PUNTOS FUNDAMENTALES</b>	<b>296</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>296</b>
<b>2. MARCO GENERAL Y EVIDENCIA DISPONIBLE</b>	<b>297</b>
<b>3. EVIDENCIA DE LOS IMPACTOS EN MÉXICO</b>	<b>305</b>
<b>4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>615</b>
<b>PARTE 4: FUENTES DE EMISIONES Y LA ESTRATEGIA DE MITIGACIÓN EN MÉXICO</b>	<b>317</b>
<b>4.1 EL SECTOR ENERGÉTICO EN MÉXICO</b>	<b>317</b>
<b>PUNTOS FUNDAMENTALES</b>	<b>317</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>317</b>
<b>2. MARCO GENERAL SOBRE EL CONSUMO DE ENERGÍA EN MÉXICO</b>	<b>318</b>
<b>3. ANÁLISIS SECTORIAL</b>	<b>322</b>
<b>4. ESCENARIOS DE CRECIMIENTO DE LA DEMANDA DE ENERGÍA</b>	<b>326</b>



4.1 PRINCIPALES RESULTADOS DE LA ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA DE ENERGÍA	327
5. EL CONSUMO DE COMBUSTIBLE	334
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	344
4.2 ESTRATEGIAS DE MITIGACIÓN PARA MÉXICO	347
PUNTOS FUNDAMENTALES	347
1. INTRODUCCIÓN	348
2. EL CONTEXTO INTERNACIONAL	348
3. ESCENARIOS DE MITIGACIÓN PARA MÉXICO	353
4. EVOLUCIÓN RECIENTE DE LAS EMISIONES EN MÉXICO	355
5. EMISIONES Y ACTIVIDADES ECONÓMICAS EN MÉXICO	357
6. COSTOS DE MITIGACIÓN EN MÉXICO	365
7. ELEMENTOS PARA UNA ESTRATEGIA DE MITIGACIÓN EN MÉXICO	373
8. MODELO DE EQUILIBRIO GENERAL COMPUTABLE	377
9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	380
<b>PARTE 5: CAMBIO CLIMÁTICO Y POLÍTICAS PÚBLICAS EN MÉXICO</b>	<b>385</b>
5.1 VALORACIÓN ECONÓMICA DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN MÉXICO	385
PUNTOS FUNDAMENTALES	385
1. INTRODUCCIÓN	385
2. CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE LA VALORACIÓN ECONÓMICA	396
3. COSTOS Y BENEFICIOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN MÉXICO	397

<b>4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>399</b>
<b>5.2 EL CAMBIO CLIMÁTICO Y LAS POLÍTICAS PÚBLICAS EN MÉXICO</b>	<b>401</b>
<b>PUNTOS FUNDAMENTALES</b>	<b>401</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>401</b>
<b>2. PLANEACIÓN Y REGULACIONES AMBIENTALES: UNA PERSPECTIVA GENERAL</b>	<b>402</b>
<b>3. LAS POLÍTICAS PÚBLICAS EN MÉXICO ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO</b>	<b>402</b>
<b>3.1 POLÍTICAS DE CONTROL ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO</b>	<b>402</b>
<b>3.1.1. SECTOR GENERACIÓN DE ENERGÍA</b>	<b>402</b>
<b>4. ADAPTACIÓN</b>	<b>404</b>
<b>5. CONCLUSIONES</b>	<b>407</b>
<b>REFERENCIAS</b>	<b>409</b>
<b>ANEXOS (CD)</b>	
<b>A.1 MODELO DE EQUILIBRIO GENERAL COMPUTABLE</b>	
<b>A.2 FONDEN (FONDO PARA DESASTRES NATURALES)</b>	
<b>A.3 IMPACTOS DE CAMBIOS EN PRECIOS RELATIVOS DE COMBUSTIBLES Y AUTOMÓVILES</b>	

## INTRODUCCIÓN

El cambio climático es uno de los grandes desafíos del siglo XXI. La evidencia científica disponible actualmente confirma la asociación entre la realización de un conjunto de actividades humanas tales como el consumo de energía fósil o el cambio de uso de suelo y las crecientes emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI). Asimismo, existe evidencia contundente que muestra la estrecha asociación entre el aumento continuo de emisiones de GEI y los impactos climáticos; en particular un aumento paulatino de la temperatura, modificaciones en los patrones de precipitación, cambios en la intensidad o en la frecuencia de eventos climáticos extremos, reducción de la criósfera y un alza en el nivel del mar. En las próximas décadas, la humanidad tendrá que enfrentar el reto simultáneo de adaptarse a los impactos originados por las nuevas condiciones climáticas, al mismo tiempo, que se instrumenta una estrategia global de mitigación.

El clima global es un bien público y por tanto, el cambio climático, desde una óptica económica, representa la mayor externalidad negativa global (Stern, 2007) y dada su magnitud, determinará en gran medida las características y condiciones del desarrollo económico en este siglo. Los impactos y los procesos de adaptación esperados serán, sin duda, impresionantes y crecientes a lo largo del siglo en diversas actividades económicas tales como el sector agropecuario, el sector hídrico, el cambio de uso de suelo, la biodiversidad, el turismo, la infraestructura y la salud de la población.

El desarrollo de nuevas opciones tecnológicas que promuevan una baja intensidad en carbono y los costos económicos de los procesos de mitigación serán ciertamente significativos en áreas como la energía o el transporte o la conservación forestal lo que modificará los patrones de desarrollo económico actual.

El cambio del clima incidirá en forma creciente en la evolución económica de los países y regiones específicas. En este contexto debe incluso reconocerse que existen en la actualidad impactos y comportamientos ya originados por el cambio climático que han conducido a diversos procesos de adaptación y de mitigación no siempre eficientes desde la perspectiva económica y menos aún para un desarrollo sustentable.

El análisis económico del cambio climático es sin embargo un tema en extremo complejo y donde sus características condicionan y limitan el tipo de estudio a realizar y en donde destacan las siguientes:

1. **El cambio climático es un fenómeno global pero que se manifiesta de manera muy heterogénea por regiones con efectos asimétricos importantes.** Ello implica diferencias significativas en la forma de abordar un estudio global y uno regional. Por ejemplo, la estrecha relación entre los procesos de mitigación y de adaptación que existe a nivel global no se sostiene por regiones. Más aún, en general, se observa que los países desarrollados que contribuyen con una mayor proporción en la generación de GEI, simultáneamente, sufren los menores impactos económicos y disponen de la mayor capacidad de adaptación y mitigación. Por el contrario, los países menos desarrollados tienen una menor contribución en emisiones pero son más sensibles a los impactos climáticos y disponen de una menor capacidad de adaptación y mitigación. Estas condiciones hacen en extremo complejo construir un acuerdo internacional para enfrentar el cambio climático e indican la importancia de disponer de estudios regionales a profundidad que contribuyan a ponderar las formas de participación de cada país.
2. **El cambio climático es un fenómeno continuo y de largo plazo, con un elevado nivel de incertidumbre, donde se requiere construir escenarios económicos de largo plazo.** En efecto, el fenómeno del cambio climático contiene un alto nivel de incertidumbre atendiendo al conjunto tan heterogéneo de las variables involucradas; climáticas, económicas, sociales, políticas, demográficas o incluso de política internacional, a los impactos específicos por regiones, a los tiempos y magnitudes de los impactos asociados a los procesos de mitigación y adaptación y atendiendo a los procesos de retroalimentación correspondientes.

En este contexto, es indispensable realizar escenarios prospectivos sobre la evolución de la economía mexicana para los próximos cien años que permitan identificar una línea base sobre la que se pueda contrastar los impactos y los procesos de mitigación y adaptación del cambio climático en México. Difícilmente este ejercicio puede considerarse como un pronóstico; esto sería como considerar que hubiera sido posible pronosticar satisfactoriamente a principios del siglo XIX a la economía mexicana actual y definir por ejemplo, la matriz energética actual. Existe además un alto nivel de incertidumbre sobre variables clave tales como las tecnologías, los precios relativos y la evolución de los sectores económicos relevantes, y debe reconocerse que en muchos casos los procesos de adaptación y mitigación modificarán el resultado final. Sin embargo, puede argumentarse que estos escenarios contienen información relevante sobre los patrones regulares de la economía mexicana y sus posibles consecuencias en el largo plazo de mantenerse el comportamiento tendencial asociado al cambio climático. De este modo, las estimaciones presentadas deben considerarse sólo como escenarios prospectivos y son órdenes de magnitud, pero no representan una proyección puntual ya que además debe considerarse el nivel de incertidumbre y riesgo inherente a este tema. Asimismo, debe reconocerse que a la complejidad del fenómeno debe agregarse la carencia de información adecuada. Desde luego, estudios más rigurosos y puntuales permitirán profundizar, validar o incluso rectificar algunos de los resultados aquí obtenidos.

- 3. El cambio climático contiene un nivel de riesgo elevado y, en este sentido, se convierte, desde el punto de vista del análisis económico, en un proceso donde debe administrarse apropiadamente el riesgo.** Esto implica reconocer que, más allá de los valores económicos puntuales que puedan asignarse a los impactos climáticos, es necesario preservar y evitar pérdidas irreversibles como en biodiversidad, y administrar apropiadamente el riesgo de un evento catastrófico con escasa probabilidad de ocurrencia o los posibles efectos de retroalimentación. Identificar apropiadamente los niveles de riesgo y ponderarlos adecuadamente requiere entonces combinar un análisis económico sólido con una toma de decisiones informada, que incluya ponderar algunos principios éticos. Esto es evidente, por ejemplo, en la selección de la tasa de descuento o en la decisión de evitar pérdidas irreversibles en biodiversidad.

El principal objetivo de este estudio es identificar, analizar y cuantificar, los costos económicos del cambio climático para México y, con base en estos resultados, proponer y recomendar diversas medidas de política pública tanto en adaptación como de mitigación. **En todo caso, el conjunto de resultados presentados en este trabajo permiten identificar dos aspectos fundamentales: en primer lugar que el cambio climático tiene impactos significativos en la economía mexicana y, en segundo lugar, que los costos de la inacción son más elevados que la participación en un acuerdo internacional equitativo que reconozca las responsabilidades comunes pero diferenciadas de los países.** Desde la óptica económica resulta más eficiente actuar que dejar el problema para las generaciones futuras, más allá de las consideraciones éticas que ello conlleva.

El estudio se realizó durante 2008 en un tiempo relativamente corto y con importantes limitantes de información. Ello representó un reto que se refleja a lo largo del estudio con diversas carencias que aquellos que trabajamos en la investigación somos los primeros en reconocer. Pero que en todo caso el trabajo busca contribuir a una toma de decisiones mejor informada en el ámbito de la política pública sobre un tema de vital importancia. Este estudio representa un esfuerzo inicial que seguramente será profundizado, complementado o corregido en diversos puntos. Desde luego, se aplica el descargo usual de los errores y omisiones en el estudio y ninguna de las instituciones coparticipantes son responsables de ellos. Más aún es probable que varios de los investigadores no vean representado sus puntos de vista en el informe final que tan elocuentemente defendieron a lo largo del trabajo. Reconozco mi responsabilidad al respecto, no obstante ello, confío en que este trabajo contribuya, en la medida de lo posible, a un mejor entendimiento del fenómeno del cambio climático en México y a construir una estrategia sólida para su solución.

El estudio “La economía del cambio climático en México” ha sido realizado a solicitud y con el apoyo financiero de las Secretarías de Hacienda y Crédito Público y de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Se contó también con apoyo financiero fundamental del Gobierno Británico y del Banco Interamericano de Desarrollo, y en la administración de los recursos fue de gran valía la participación de la Asociación de Exalumnos de la Facultad de Economía de la UNAM, presidida por el Embajador Jorge Eduardo Navarrete. Se contó también con la asistencia del Banco Mundial y la Comisión Económica para América Latina y el Caribe de las Naciones Unidas. La Facultad de Economía de la UNAM me otorgó un importante apoyo institucional, y su Director, el Dr. Roberto Escalante además contribuyó con comentarios y sugerencias. Participaron también los titulares y personal del Centro Mario Molina, del Instituto Nacional de Ecología y del Centro de Estudios de la Atmósfera de la UNAM. En el proceso de su elaboración se constituyó un Comité Asesor, conformado por Francisco Barnés, Julia Carabias, Fausto Hernández, Enrique Lendo, Mario Molina, Enrique Provencio, Gabriel Quadri y José Sarukhán, a quienes agradezco sus comentarios, aportes y observaciones. Asimismo, el apoyo de las instituciones que lo promovieron fue fundamental, en especial de sus funcionarios, pero quisiera destacar la participación de Juan Rafael Elvira Quesada, Secretario de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Fernando Tudela Abad, Subsecretario de Planeación y Política Ambiental y Roberto Cabral, Director General Adjunto de Financiamiento Estratégico, ambos de esa Secretaría, de Ricardo Ochoa Rodríguez, Titular de la Unidad de Asuntos Internacionales, de la Secretaría de Hacienda y Crédito Público, y de Adrián Fernández Bremauntz, Presidente del Instituto Nacional de Ecología. El Embajador del Reino Unido, Giles Paxman, fue un entusiasta promotor y el personal de la Embajada un importante apoyo.

Debo además reconocer la gran disposición para discutir los temas de este estudio de diversos integrantes de la Secretaría Técnica del Gabinete Social de la Presidencia de la República, SHCP, SEMARNAT, INE, Centro Mario Molina, BID, Banco Mundial y CEPAL. Específicamente me siento comprometido a agradecer por su tiempo y sus valiosos comentarios a Alicia Bárcena, Juan Carlos Belausteguigoitia, Juan Pablo Bonilla, Fernando Cuevas, Carlos Raúl Delgado, Claudia Grayeb, Rodolfo Lazy, Julie Lennox, Juan Mata, Liliana Meza, Rosa Elena Montes de Oca, Carlos Muñoz Piña, Celia Piguero, Silvia Rodríguez, Leonora Rojas y José Luis Samaniego. Asimismo, quisiera agradecer el apoyo, comentarios y sugerencias del equipo Stern para la realización de este estudio; en particular de Sir Nicholas Stern, Chris Taylor y Dimitri Zengelis. En su elaboración participaron diversos investigadores mereciendo especial mención María Esther Álvarez, Allan Beltrán, Héctor Bravo, Karina Caballero, Karla Caballero, Horacio Catalán, Yanet Domínguez, Francisco Estrada Porrúa, Jimmy Ferrer, Manuel García, Carlos Gay, Alejandro Guevara, Fausto Hernández, Ma. Eugenia Ibararán, Luis Jaramillo, Ramón Lepez, Víctor Magaña, Carlos Muñoz Piña, Federico Navarrete, Jaime Olivares, Ma. del Carmen Palafox, Enrique Provencio, Fernando Rello, Erika Rojas, Luis Sánchez, Juan Manuel Torres y Eduardo Vega. Finalmente, debo mencionar que sin el apoyo de Fernando Tudela, Roberto Cabral y Ricardo Ochoa este estudio no hubiera sido posible.

Maerle, Saskia y Jasper le dieron sentido a este estudio.



## PARTE 1: LA CIENCIA DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN MÉXICO

### 1.1 EL CAMBIO CLIMÁTICO: EVIDENCIA INTERNACIONAL

#### Puntos fundamentales

El cuarto informe del Grupo Intergubernamental de expertos sobre el cambio climático o Panel Intergubernamental del cambio climático (IPCC) elaborado en 2007 establece cuatro conclusiones científicas básicas:

1. El calentamiento del sistema climático mundial es un fenómeno inequívoco.
2. El aumento de los Gases de Efecto Invernadero (GEI) ha registrado un incremento importante desde 1750 asociado fundamentalmente a diversas actividades antropogénicas.
3. El calentamiento global significará, para este siglo, un aumento en la temperatura del planeta de entre 0.3°C a 6.4°C (todo el horizonte de posibilidades) con una media de entre 0.6°C a 4.0°C., cambios en los patrones de precipitación, modificaciones en el tipo, frecuencia e intensidad de los eventos extremos, una reducción de la criósfera y un incremento en el nivel del mar de entre 18 a 59 milímetros aproximadamente.
4. El calentamiento global, originado por las actividades humanas, está teniendo una influencia discernible sobre muchos de los sistemas físicos y biológicos.

Estas cuatro conclusiones se manifiestan en algunos patrones consistentes asociados al cambio climático: incremento de la temperatura global aunque en forma heterogénea por regiones; intensificación del ciclo hidrológico, por un lado incremento en precipitaciones fuertes en algunas zonas del planeta y por otro lado sequías intensas; derretimiento de las capas de hielo con la consecuente disminución de la superficie de hielo en el planeta lo que se asocia también al aumento en el nivel del mar y a la inundación y destrucción de algunas costas; incremento en la temperatura y aumento de la acidez de la superficie oceánica y, finalmente, cambios en los patrones de eventos extremos. Por ejemplo, la evidencia disponible indica que la tasa de calentamiento global durante los últimos 50 años ha sido en promedio de  $0.13^{\circ}\text{C} \pm 0.03^{\circ}\text{C}$  por década, duplicándose en los últimos 100 años. Las precipitaciones fuertes han crecido de una manera alarmante desde 1950 incluso en regiones donde las precipitaciones eran menores; mientras que por el otro lado, se han presentado aumentos en las sequías desde 1970, particularmente en los trópicos y subtropicos. En la criósfera se presenta una reducción importante en la capa de nieve principalmente del hemisferio norte; lo que está ocasionando variaciones en los niveles del mar con una tasa media mundial, de  $3.1 \pm 0.7$  mm por año, entre 1993 y 2003.

El cambio climático es consecuencia fundamentalmente de las actividades antropogénicas. Actualmente se estima que las emisiones GEI son, aproximadamente, el equivalente a 430 ppm bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) o  $\text{CO}_2\text{e}$  o CO equivalente)<sup>1</sup> y se espera que aumenten, en promedio, en 2.3 ppm cada año<sup>2</sup>. Estimaciones recientes (Siegenthaler, *et al.* 2005) muestran además que el nivel de concentraciones actuales son las más elevadas en los últimos 1,000 años. En los últimos veinte años, el aumento de la concentración de GEI es el factor dominante en el forzamiento radiativo y aunque algunos de los GEI se producen de manera natural su incremento reciente se debe, fundamentalmente, a las actividades antropogénicas. La concentración actual de  $\text{CO}_2$  no ha sido superada en los últimos 650,000 años y probablemente tampoco en los últimos 20 millones de años; así, esta concentración aumentó, desde 1750, aproximadamente 100 ppm pasando de 280 a 379 ppm. de  $\text{CO}_2$ .

La estrecha asociación entre emisiones GEI y el cambio climático permite entonces la construcción de diversos escenarios de emisiones, con distintos supuestos económicos y sociales, con sus correspondientes consecuencias climáticas.

<sup>1</sup> Se estimaba antes de la revolución industrial un nivel de 280 ppm (partes por millón) de  $\text{CO}_2$  y de 290 ppm de  $\text{CO}_2\text{e}$ .

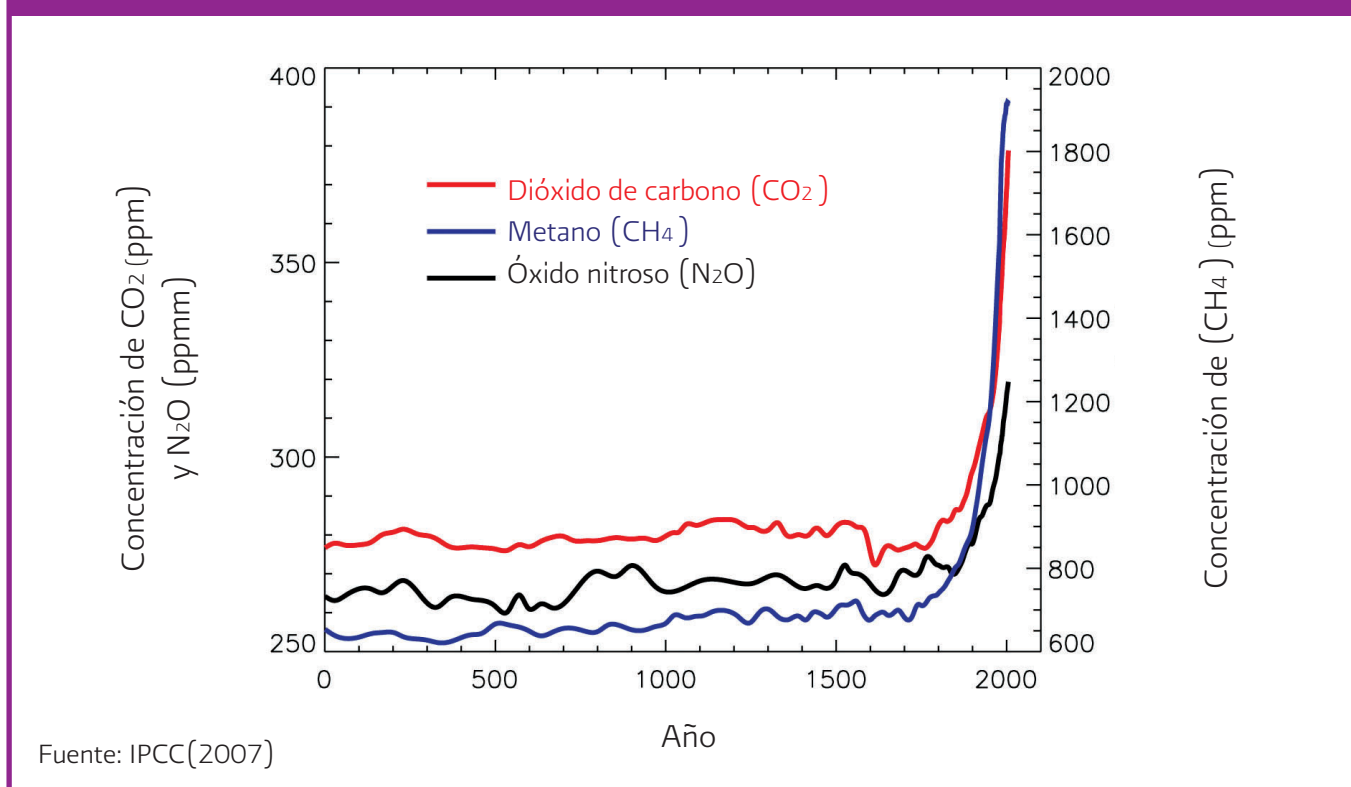
<sup>2</sup> Se incluyen en el  $\text{CO}_2\text{e}$  los seis gases incluidos en el protocolo de Kioto (SEMARNAT-INE, 2001).

## 1. INTRODUCCIÓN

La investigación científica sobre el cambio climático se ha desarrollado considerablemente en los últimos años confirmado que las actividades antropogénicas relacionadas con la quema de los combustibles fósiles y los cambios de uso de suelo son los principales responsables del fenómeno climático (IPCC, 2007 y Schellnhuber *et al.*, 2004). Así, el cuarto informe del Grupo Intergubernamental de expertos sobre el cambio climático o Panel Intergubernamental del Cambio Climático IPCC (2007) establece cuatro conclusiones científicas básicas:

1. El calentamiento del sistema climático mundial es inequívoco.
2. Los GEI han registrado un incremento desde 1750 asociado fundamentalmente al proceso de industrialización y están ocasionando un incremento de la temperatura global del planeta. Estimaciones recientes (Siegenthaler, *et al.* 2005) muestran que el nivel de concentraciones actuales son las más elevadas en los últimos 1,000 años como lo muestra la Gráfica 1.

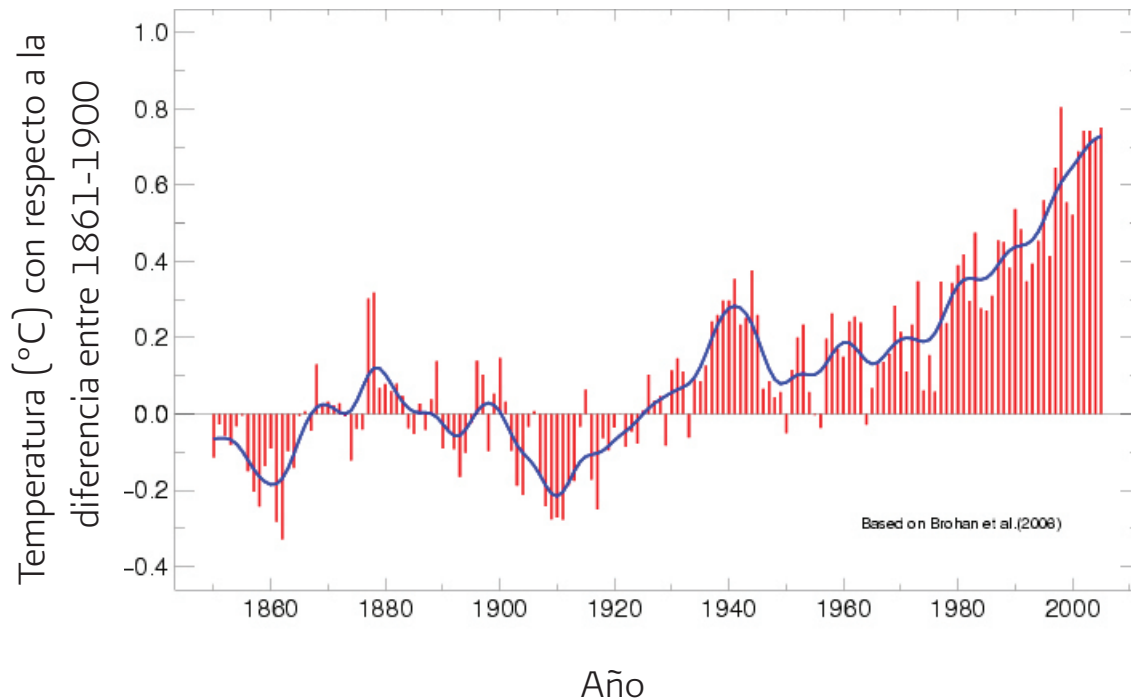
Gráfica 1. Concentraciones de gases de efecto invernadero del año 0 al 2005



3. El calentamiento global significará un aumento en la temperatura del planeta y se espera, con mayor probabilidad, que para finales del presente siglo dicho aumento sea de entre 2° y 4°C (con la mejor estimación en 3°C) con un incremento en el nivel del mar de 0.18 a 0.59 m dependiendo de la concentración de GEI que se alcance.



Gráfica 2. Evolución de las diferencias de la temperatura promedio mundial 1850-2005



Fuente: Brohan et al. 2006.

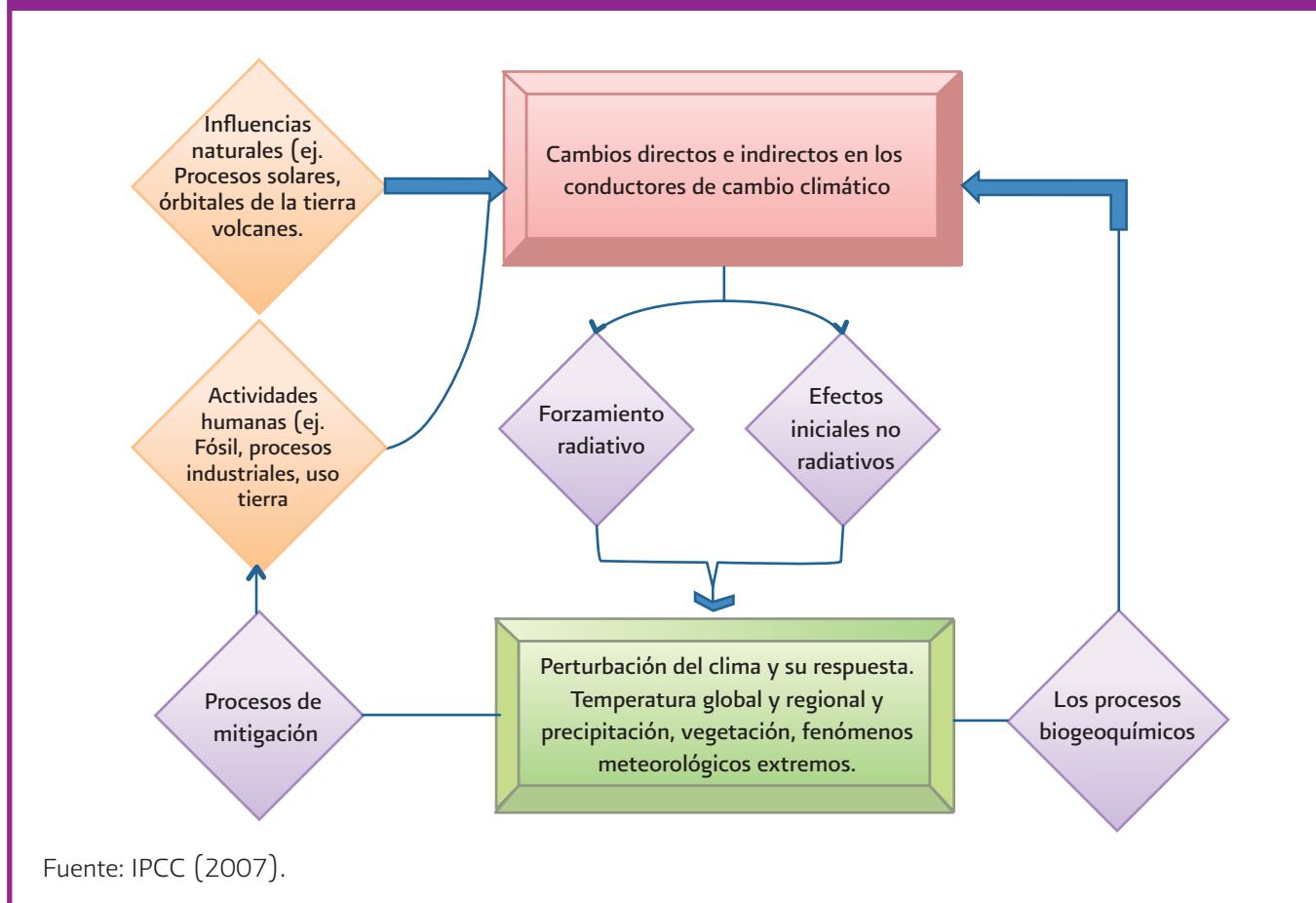
4. El calentamiento provocado por las actividades antropogénicas está teniendo una influencia discernible sobre muchos de los sistemas físicos y biológicos.

Estas cuatro conclusiones tienen su traducción práctica en lo que los propios científicos del IPCC llaman los patrones consistentes asociados al cambio climático: derretimiento de las capas de hielo que están en las partes más frías del planeta, lo que provoca el aumento en el nivel del mar y la inundación y destrucción de algunas costas; presencia e intensidad de lluvia en tiempos y lugares antes no existentes; sequías más prolongadas e intensas en otras zonas; extinción de muchas especies animales y vegetales; aumento de enfermedades; incremento en la intensidad o el número de los eventos extremos como ciclones tropicales (IPCC, 2007).

## 2. IMPULSORES ANTROPOGÉNICOS Y NATURALES DEL CAMBIO EN EL CLIMA

El clima es un sistema complejo, interactivo entre la atmósfera, la superficie terrestre, la nieve y el hielo, los océanos, el agua, y los seres vivos. El sistema climático evoluciona en el tiempo atendiendo a un complejo conjunto de factores internos y externos (estos factores externos se conocen como “forzamientos”) (Figura 1). Los forzamientos externos incluyen los fenómenos naturales como erupciones volcánicas y las variaciones en la actividad solar, así como aquellos ocasionados por los seres humanos que provocan cambios en la composición de la atmósfera o en las condiciones en la superficie del planeta.

Figura 1. Componentes de los procesos del Cambio Climático



Fuente: IPCC (2007).

Las actividades humanas y los procesos naturales son causas directas e indirectas de variaciones en el clima. En las últimas décadas, el aumento de la concentración de los GEI es el factor dominante en el forzamiento radiativo (FR). Esto es, el incremento reciente de los GEI se debe fundamentalmente a las actividades humanas aunque algunos de estos gases se producen de manera natural. Así, el aporte de cada GEI al FR se determina por el cambio en su concentración atmosférica y la efectividad del gas para modificar el balance radiativo, de este modo, la concentración actual de un gas de efecto invernadero en la atmósfera es el resultado neto de sus emisiones y de las eliminaciones pasadas de la atmósfera (cuadro 1) y en donde se puede observar que (IPCC, 2007):

1. El dióxido de carbono ha aumentado por el uso fundamentalmente de combustibles fósiles en el transporte, la construcción, la calefacción y la refrigeración y un conjunto de actividades industriales tales como la fabricación de cemento y otros bienes, por la deforestación y por procesos naturales así como por la descomposición de materia vegetal. La concentración de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera ha aumentado de 280 ppm en 1750 a 367 ppm en 1999 y a 379 ppm en 2005 (Cuadro 1) (IPCC, 2007). La concentración actual de  $\text{CO}_2$  no ha sido superada en los últimos 650,000 años y probablemente tampoco en los últimos 20 millones de años. Así, a partir de 1750 esta concentración aumentó aproximadamente 100 ppm. La tasa de aumento en el siglo pasado no tiene precedentes, por lo menos durante los últimos 20,000 años. De este modo, la tasa media de crecimiento de 1995 a 2005 es de 1.9 ppm al año y se estima que en la actualidad es ligeramente superior a 2 ppm por año (Gráfica 3).

## CUADRO 1. EJEMPLOS DE GASES DE EFECTO INVERNADERO EN LOS QUE INFLUYEN LAS ACTIVIDADES HUMANAS.

	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	CFC-11	HFC-23	CF <sub>4</sub>
Concentración preindustrial	Unas 280 ppm	Unas 700 ppmm	Unas 270 ppmm	Cero	Cero	40 ppb
Concentración en 1998	365 ppm	1745 ppmm	314 ppmm	268 ppb	14 ppb	80 ppb
Ritmo del cambio de concentración <sup>b</sup>	1.5 ppm/año <sup>a</sup>	7.0 ppmm/año <sup>a</sup>	0.8 ppmm/año	-1.4 ppb/año	0.55 ppb/año	1 ppb/año
Tiempo de vida en la atmósfera.	5 a 200 años <sup>c</sup>	12 años <sup>d</sup>	114 años <sup>d</sup>	45 años	260 años	>50,000 años

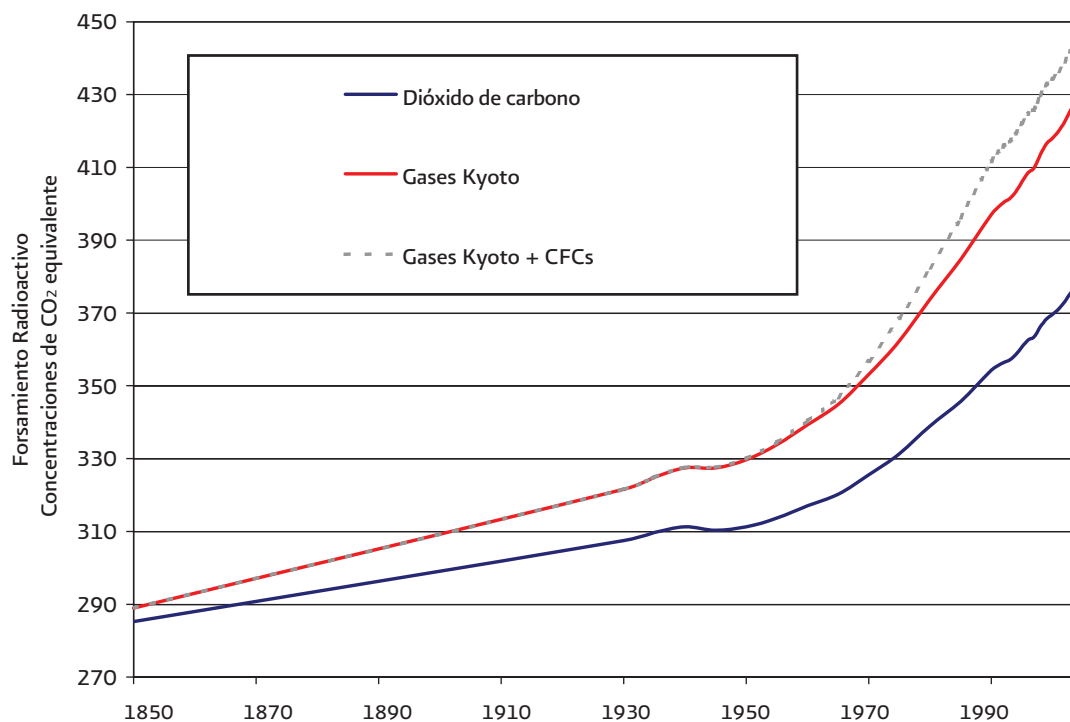
<sup>a</sup> El ritmo ha fluctuado entre 0.9 ppm/año para el CO<sub>2</sub> y entre 0 y 13 para el CH<sub>4</sub> en el periodo 1990–1999.

<sup>b</sup> El ritmo se calcula para el periodo 1990–1999.

<sup>c</sup> No puede definirse un solo periodo de vida para el CO<sub>2</sub>, dados los diferentes índices de absorción por diferentes procesos de eliminación.

<sup>d</sup> Este periodo de vida ha sido definido como un "tiempo de ajuste" que tiene en cuenta el efecto indirecto del gas en su propio tiempo de residencia.

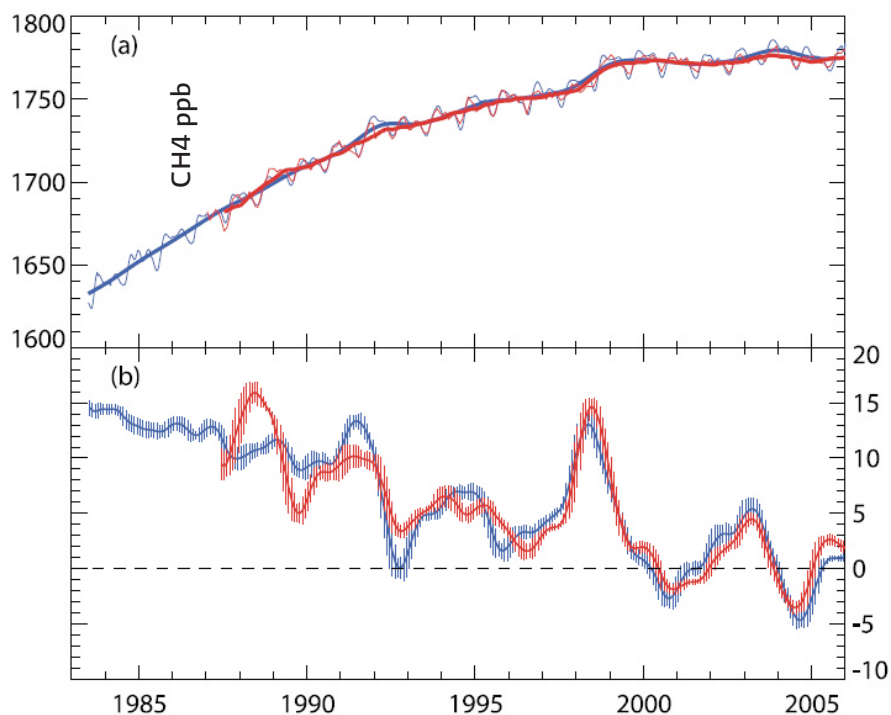
Gráfica 3. Evolución de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero



Fuente: STern, (2007).

- El metano es GEI que procede de fuentes tanto naturales (ej. los humedales) como por actividades influidas por el ser humano (ej. agricultura, actividades de gas natural y vertederos). Las concentraciones de metano (CH<sub>4</sub>) en la atmósfera han aumentado en un 150% (1,060 ppm) desde 1750. La concentración actual de CH<sub>4</sub> no ha sido superada durante los últimos 650,000 años, y corresponde fundamentalmente a las emisiones antropogénicas que superan las emisiones naturales. Ello hace muy probable que sea la actividad humana la causante de los cambios a largo plazo observados en este gas (IPCC, 2007) (Gráfica 4).

Gráfica 4. Concentraciones recientes y tendencias del metano Serie de tiempo (a) y su tasa de crecimiento (b)



Fuente: IPCC(2007)

3. Los clorofluorocarbonos (CFC) y los hidroclorofluorocarbonos son GEI que tienen un origen puramente antropogénico y una gran variedad de aplicaciones. El ozono troposférico es un GEI de corta vida producido principalmente por monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y formaldehídos (IPCC, 2007).
4. El forzamiento radiativo debido a la destrucción del ozono estratosférico se reevaluó en  $-0.05 \pm 0.10 \text{ W m}^{-2}$ . Este es afectado por la emisión directa de vapor de agua ocasionado por las actividades humanas (principalmente el regadío que representa menos del 1% de las fuentes naturales del vapor de agua atmosférico).
5. El IPCC (2007) estima que el forzamiento radiativo causado por el aumento del vapor de agua estratosférico debido a la oxidación del  $\text{CH}_4$  es  $+0.07 \pm 0.05 \text{ W m}^{-2}$ .

Actualmente se estima que las emisiones de GEI son el equivalente a 430 ppm bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) o  $\text{CO}_2$  e o  $\text{CO}_2$  equivalente)<sup>3</sup> y se espera que aumente en 2.3 ppm cada año<sup>4</sup>. Estimaciones recientes (Siegenthaler, *et al.* 2005) muestran además que el nivel de concentraciones actuales son las más elevadas en los últimos 1,000 años como se observa en la Gráfica 3.

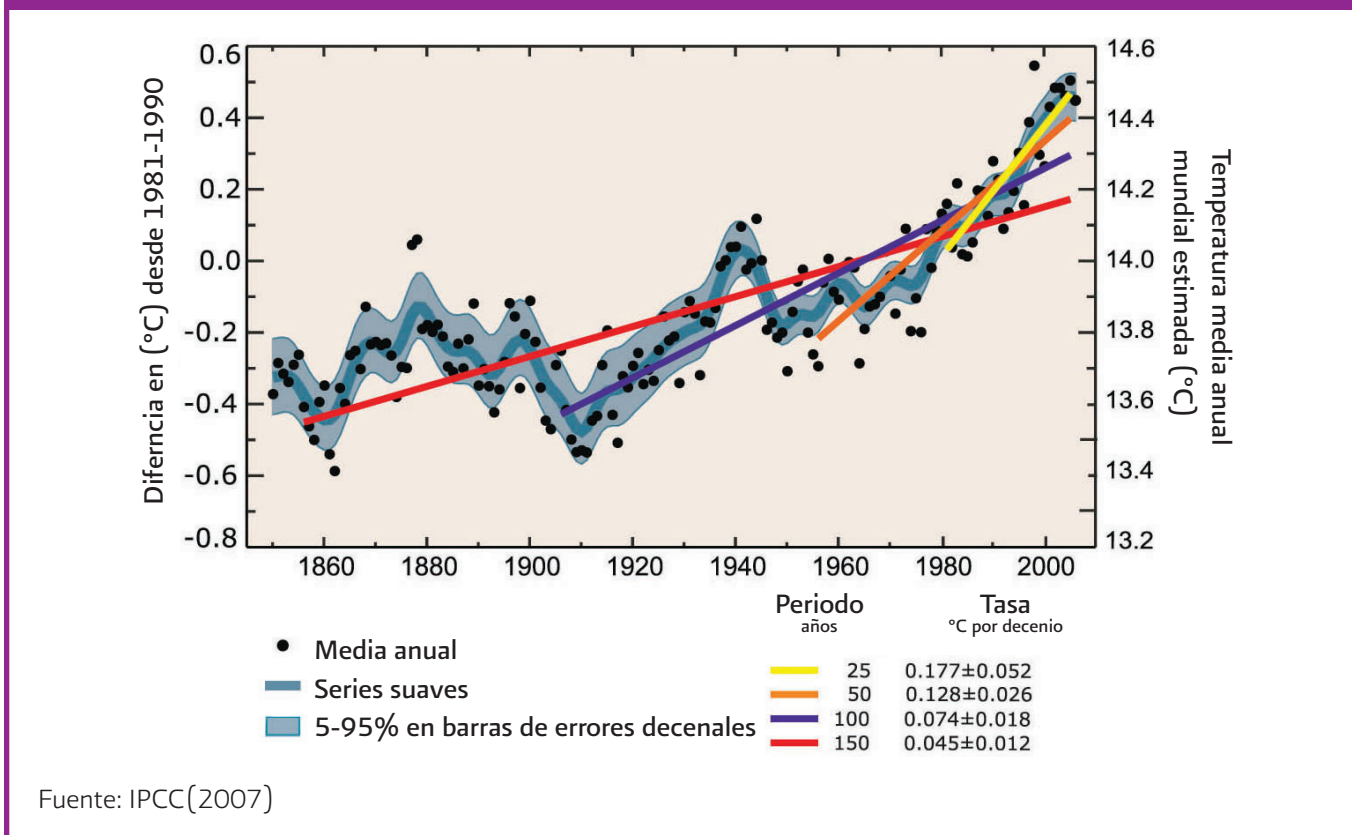
<sup>3</sup> Se estima antes de la Revolución Industrial un nivel de 280 ppm (partes por millón) de  $\text{CO}_2$  y de 290 ppm de  $\text{CO}_2$ e.

<sup>4</sup> Se incluyen en el  $\text{CO}_2$ e los seis gases incluidos en el protocolo de Kyoto (SEMARNAT-INE, 2001).

### 3. LA EVIDENCIA INTERNACIONAL

La evidencia internacional sobre el cambio climático es inequívoca y se manifiesta en diversos patrones climáticos. Así, el aumento observado en las temperaturas medias mundiales es evidente y más intenso desde mediados del siglo XX. De este modo, la evidencia disponible indica un aumento promedio<sup>5</sup> de 0.7°C de temperatura durante el siglo XX (Brohan, *et al*, 2006) con una tasa de calentamiento promedio durante los últimos 50 años de 0.13°C ± 0.03°C por década (IPCC, 2007) e, incluso, un aumento del 0.2°C cada diez años durante las últimas tres décadas (Stern, 2007). Estos cambios en la temperatura han ocasionado disminuciones de días helados en las regiones de latitud media y reducción de días con fríos extremos. Asimismo, el calentamiento global ha ocasionado que las olas de calor se incrementen desde mediados del siglo XX. Por ejemplo, entre 1998 y 2005, se reportaron las temperaturas de aire superficial global más altas con respecto a 1750 (Gráfica 5); además el periodo de 1995-2006 incluye los 12 años más cálidos desde mediados del siglo XIX.

Gráfica 5. Trayectoria de la temperatura media anual mundial



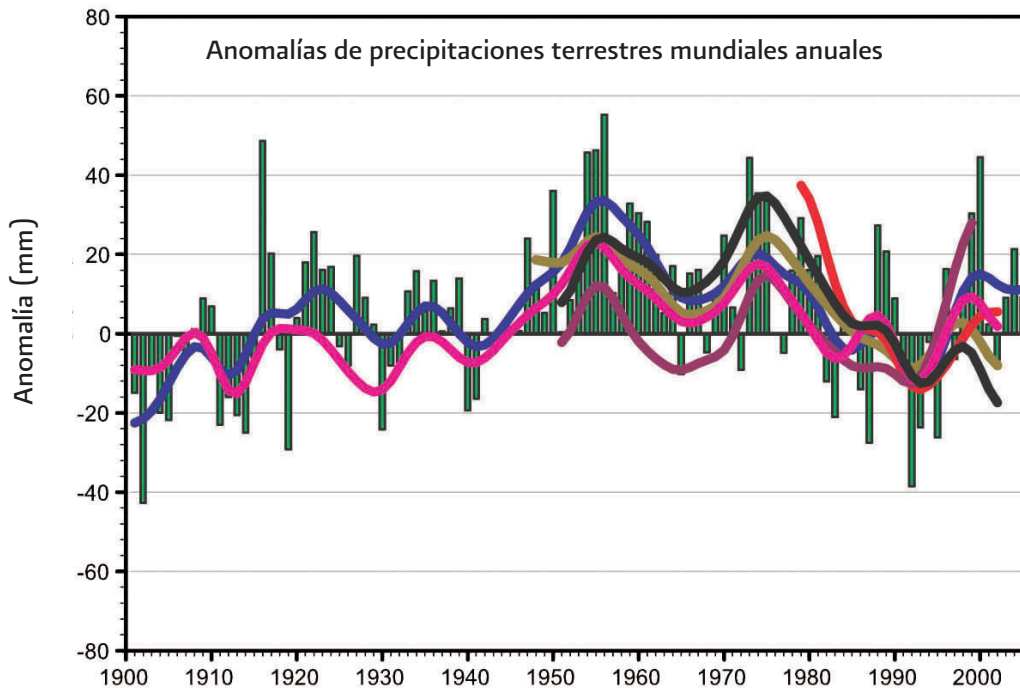
Los ciclos hidrológicos muestran cambios significativos (Gráfica 6) en donde destacan:

1. Un aumento de precipitaciones fuertes que está relacionado con el incremento de los ciclones tropicales en el Atlántico Norte en la década de los años setenta debido al aumento de la temperatura superficial del mar tropical; aunque esta tendencia no es muy clara a nivel mundial.

<sup>5</sup> Existen, desde luego, diferencias por regiones y entre el mar y la tierra.

2. En el otro extremo, se han presentado aumentos en las sequías desde 1970, particularmente en los trópicos y subtropicos que están relacionadas con las disminuciones de las precipitaciones y con temperaturas más altas.

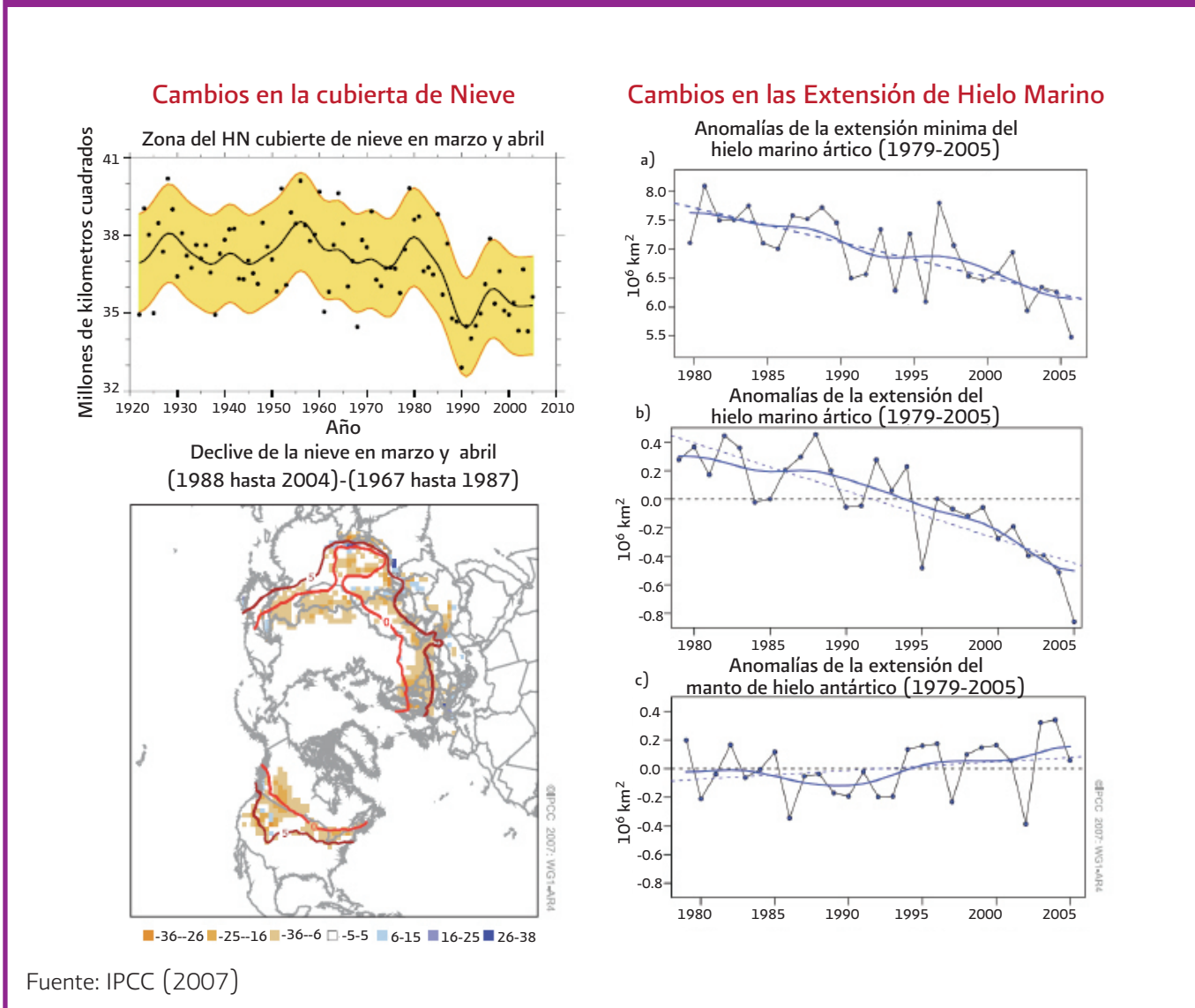
**Gráfica 6. Series de tiempo anomalías de precipitaciones terrestres mundiales anuales (mm)**



Fuente: IPCC(2007)

En lo referente a la criósfera se observa que el hielo cubre cerca de 10% de la superficie terrestre y que en invierno llega a cubrir aproximadamente el 49% del territorio terrestre del hemisferio norte. La importancia de la nieve y el hielo para el clima radica, entre otros factores, en que reflejan aproximadamente el 90% de la radiación solar incidente mientras que el resto es reflejado por los océanos o tierras con vegetación, siendo en general este reflejo una parte importante en los procesos energéticos y climáticos. La evidencia disponible muestra que se ha presentado una reducción importante en la capa de nieve principalmente del hemisferio norte de 1966 a 2005; en particular, en estaciones como la primavera donde se registraba ya una disminución de la criósfera del 5% anual para finales de los años ochenta; caso contrario con el hemisferio sur en donde los registros indican que se han presentado pequeñas disminuciones o que prácticamente se ha mantenido el mismo nivel de hielo desde hace cuarenta años (Gráfica 7) (IPCC, 2007). El deshielo del hemisferio norte está ocasionando variaciones en los niveles del mar. Igualmente se han presentado disminuciones en terrenos congelados de cerca de un 7% en el hemisferio norte desde la segunda mitad del siglo XX, incluso se registra en primavera un 15% de disminución; y en capas de nieve en otras partes del mundo, principalmente la nieve de las montañas como en los casos de América del Norte Occidental y en los Alpes suizos.

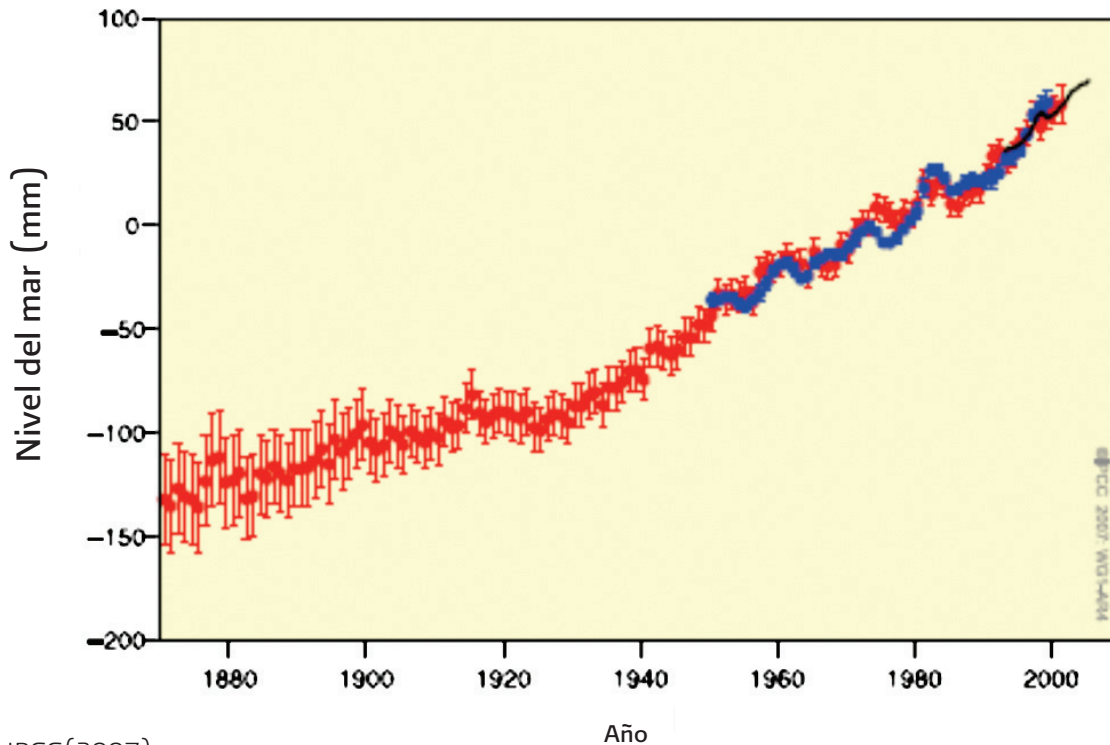
## Gráfica 7. Cambios en la criósfera debido al cambio climático



En los océanos el cambio climático se refleja tanto en cambios en su temperatura y su salinidad. Los indicadores muestran que el cambio en la temperatura de los océanos comenzó a mediados de la década del siglo XX ya que se ha presentado un calentamiento sobre los 700 metros más superficiales. Destaca el caso del calentamiento en la cuenca del Océano Atlántico que es mayor que la cuenca del Pacífico, los océanos australes y el Océano Índico (IPCC, 2007). Los registros también indican que se han presentado enfriamientos importantes en los últimos 50 años en la zona del Atlántico y Pacífico Norte y Pacífico Ecuatorial. Las anomalías en la temperatura de los océanos y el cambio en el nivel del mar han ocasionado un cambio importante en la bioquímica y la salinidad debido a la mezcla con el  $\text{CO}_2$  ya que el aumento de este gas ocasiona que disminuya el PH haciendo más ácidos a los océanos. En cuanto al nivel del mar se observa un aumento desde 1860. Los resultados técnicos de esta modificación indican que la tasa media mundial del aumento del nivel del mar, medido por el satélite altímetro TOPEX/Poseidón un aumento de 1.8 mm por año entre 1961 y 2003 y de  $3.1 \pm 0.7$  mm por año entre 1993 y 2003 (Gráfica 8). En este contexto, el aumento total durante el siglo XX se estima en  $0.17 \pm .05$  mm aunque persiste un alto nivel de incertidumbre (IPCC, 2007).



Gráfica 8. Nivel medio mundial del mar: 1860 - 2002



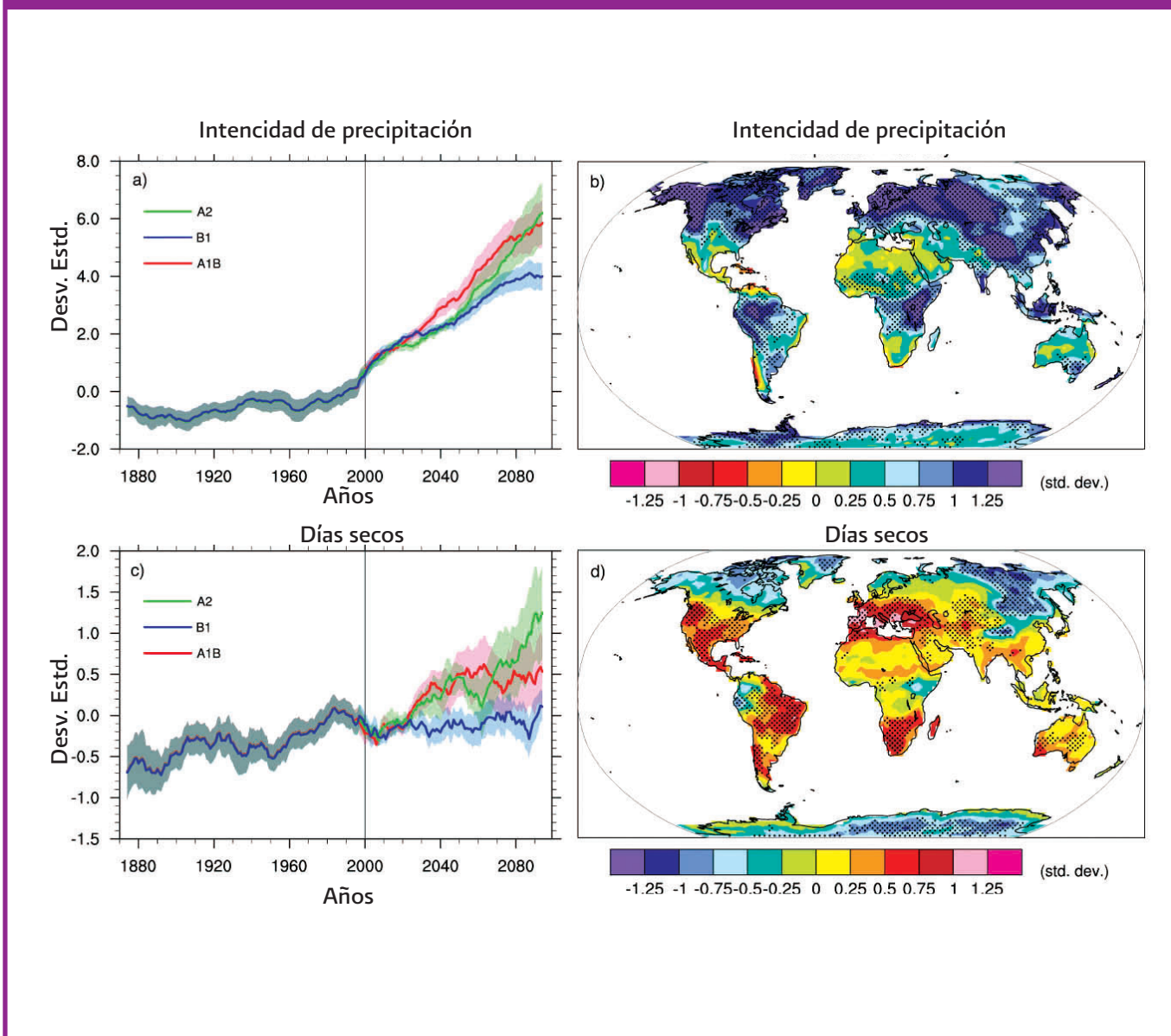
Fuente: IPCC(2007)

En varias regiones del mundo se han observado modificaciones en diversos tipos de episodios meteorológicos extremos (Gráfica 9) (IPCC, 2007):

1. En los últimos 50 años ha habido una disminución significativa anual de noches frías y un incremento notable anual de noches cálidas.
2. En los últimos 50 años, la distribución de las temperaturas mínimas y máximas no solo ha alcanzado valores superiores, acorde con el calentamiento general; sino que también los extremos fríos han visto mayores incrementos de temperatura que los extremos cálidos.
3. En los últimos 50 años se han generado incrementos de episodios de precipitación intensa en las latitudes medias, aún en lugares donde no ha aumentado la precipitación media
4. Desde mediados del siglo XX se muestra una tendencia a la sequía en muchas zonas terrestres del hemisferio norte, con una sequía generalizada en la mayor parte de Eurasia Meridional, África Septentrional, Canadá y Alaska.
5. El fenómeno El Niño-Oscilación Meridional afecta fuertemente la ubicación y actividad de las tormentas tropicales en todo el mundo. La cantidad de huracanes de categoría 4 y 5 ha aumentado en  $\approx 75\%$  desde 1970. Sin embargo, es importante recordar que los cambios en la frecuencia e intensidad de tormentas tropicales y huracanes se encubren con una gran variabilidad natural.



Gráfica 9. Proyecciones de eventos extremos



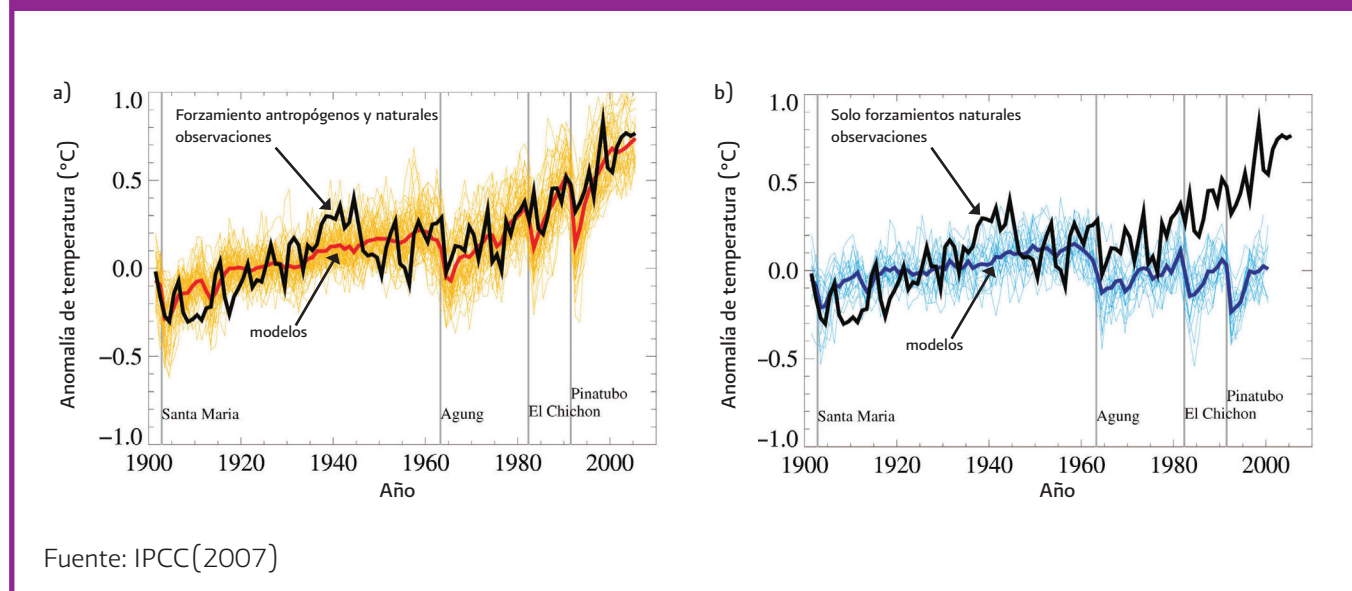
La evidencia disponible para América Latina muestra un aumento paulatino pero continuo de la temperatura media (IPCC, 2007). Asimismo, estudios recientes de detección de cambios en el clima muestran que en Mesoamérica y el Caribe existe una tendencia a un aumento de los eventos hidrometeorológicos extremos (Aguilar, *et al* 2005). Así, desde 1950, se han incrementado en la región tanto el número como la intensidad de ondas de calor y tormentas severas. Sin embargo, no basta con detectar dichas señales de intensificación en el ciclo hidrológico regional, sino que es aun necesario hacer ejercicios de atribución para poder afirmar que dichas tendencias de cambio son parte del proceso de cambio climático de origen antropogénico y no sólo una señal de variabilidad de muy baja frecuencia en el clima. En este sentido, es aún necesario profundizar la investigación al respecto. Las estimaciones más recientes indican además que los ritmos actuales de los cambios climáticos parecen estar incrementándose, en particular a partir desde los años ochenta.

## 4. FACTORES QUE INDUCEN EL CAMBIO CLIMÁTICO

La evidencia científica disponible muestra claramente la asociación entre el cambio climático y las actividades antropogénicas. Más aun, los cambios climáticos observados no pueden explicarse considerando exclusivamente a factores o forzamientos naturales (Gráfica 10). Así, el forzamiento antropogénico ha contribuido al calentamiento extendido en las temperaturas oceánicas y terrestres durante la última mitad del siglo XX, básicamente a través de la quema de combustibles fósiles y del cambio de uso de suelo, y a las disminuciones observadas en la extensión del hielo marino ártico (IPCC, 2007). Asimismo, la tasa de incremento del nivel del mar entre 1993 y 2003 se podría vincular al creciente forzamiento antropogénico y al amplio retroceso glaciar, no obstante que tuvieron lugar altas tasas similares en períodos decenales previos a partir de 1950. Ello implica que la variabilidad natural interna puede ser también un factor en las altas tasas desde 1993 a 2003; en este sentido, se desconoce exactamente la proporción de la tasa de incremento que se debe atribuir al cambio climático antropogénico y aquella que se debe a la variabilidad natural interna del clima.

Existen análisis del impacto de las influencias externas sobre el ciclo hidrológico donde los cambios en las precipitaciones corresponden a la influencia humana. Los modelos y observaciones realizadas por el IPCC (2007) sugieren, por ejemplo, que cambios en el uso de la tierra, debido al exceso de pastoreo o conversión de bosques para la agricultura, no representan la causa primaria de las sequías en el Sahel y Australia pero que los cambios en los monzones, la intensidad de las tempestades y las precipitaciones en Sahel están, por lo menos, en parte, relacionados con los cambios observados en la Temperatura Superficial del Mar (TSM). Por otra parte, los cambios en general de la precipitación dependen de la TSM y de sus cambios espaciales y temporales además, de cambios regionales en la circulación atmosférica muchas veces relacionados con cambios en el uso de suelo (eg Islas de Calor). Ello hace complicado identificar, con precisión, a las influencias humanas.

Gráfica 10. Anomalías de temperaturas superficial media mundial



Notas: (a) Anomalías en la temperatura superficial media mundial relativas al periodo de 1901 a 1950, según observaciones, (línea negra) y como resultado de simulaciones con forzamientos antropogénicos y naturales. La línea gruesa curva, en rojo, muestra la media del conjunto de varios modelos y la línea curva delgada rojo claro muestra las simulaciones individuales. Las líneas grises verticales indican importantes fenómenos volcánicos. (b) Igual que en (a), solo que las anomalías simuladas de la temperatura media mundial son solamente para los forzamientos naturales. La curva gruesa azul muestra la media del conjunto multimodelo y la curva azul más clara muestra las simulaciones individuales. Cada simulación fue muestreada para que la cobertura se corresponda con las observaciones.

## 5. PROYECCIONES DE CAMBIOS CLIMÁTICOS FUTUROS

El cambio climático futuro está determinado entonces fundamentalmente por la evolución de las emisiones de GEI. Las fuentes de estas emisiones son, fundamentalmente, las actividades antropogénicas que se originan en el conjunto de diversas actividades económicas; de este modo, las proyecciones climáticas corresponden a diversos escenarios socioeconómicos. Los principales escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero del IPCC, presentados en el *Special Report on Emmission Scenarios (SRES)* son:

1. La familia de líneas evolutivas y escenarios **A1** describe un mundo futuro con un rápido crecimiento económico, una población mundial que alcanza su valor máximo hacia mediados de siglo y disminuye posteriormente, y una rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficientes. Sus características distintivas más importantes son la convergencia entre regiones, la creación de capacidades e interacciones culturales y sociales, acompañadas de una notable reducción de las diferencias regionales en cuanto a ingresos por habitante.
2. La familia de líneas evolutivas y escenarios **A2** describe un mundo muy heterogéneo. Sus características más distintivas son la autosuficiencia y la conservación de las entidades locales. Las pautas de fertilidad en el conjunto de las regiones convergen muy lentamente, con lo que se obtiene una población mundial en continuo crecimiento. El desarrollo económico está orientado básicamente a las regiones, y el crecimiento económico por habitante así como el cambio tecnológico están más fragmentados y son más lentos que en otras líneas evolutivas.
3. La familia de líneas evolutivas y escenarios **B1** describe un mundo convergente con una misma población mundial que alcanza su valor máximo hacia mediados de siglo y desciende posteriormente, pero con rápidos cambios en las estructuras económicas orientados a una economía de servicios y de información, acompañados de una utilización menos intensiva de los materiales y la introducción de tecnologías limpias, con un aprovechamiento eficaz de los recursos. En ella se da preponderancia a las soluciones de orden mundial encaminadas a la sostenibilidad económica, social y ambiental, así como a una mayor igualdad, pero en ausencia de iniciativas adicionales en relación con el clima.
4. La familia de líneas evolutivas y escenarios **B2** describe un mundo en el que predominan las soluciones locales a la sostenibilidad económica, social y ambiental. Es un mundo cuya población aumenta a un ritmo menor que en el escenario A2, con unos niveles de desarrollo económico intermedios y con un cambio tecnológico más lento y más diverso que en las líneas evolutivas B1 y A1. Aunque este escenario está también orientado a la protección del medio ambiente y la igualdad social, se centra principalmente en los niveles local y regional.

Los cambios de temperatura y aumentos en el nivel del mar relativos a 1980–1999 para seis escenarios de emisiones se sintetizan en el Cuadro 2. Así, se observa un aumento continuo de la temperatura proyectado para el siglo XXI aunque con una incertidumbre importante dada por la dispersión entre las proyecciones de diversos modelos. El calentamiento es mayor en los continentes y en la mayoría de las latitudes altas del Hemisferio Norte durante el invierno. En otras zonas geográficamente similares, el calentamiento es típicamente mayor en las regiones áridas que en las regiones húmedas. El cambio climático proyectado en el caso en que las concentraciones de GEI permanecieran constantes corresponde a una tendencia de calentamiento de aproximadamente 0.1°C por decenio, bajo ausencia de cambios en el forzamiento radiativo volcánico o solar. Se prevé además un aumento del calentamiento medio oceánico por zonas; primero cerca de la superficie y en las latitudes medias septentrionales, y después alcanzando gradualmente el océano interior, de un modo más evidente en latitudes altas. Asimismo, se observan cambios significativos en las precipitaciones proyectadas.

El ensamble que corresponde a un valor promedio de los diversos experimentos al proyectar el clima a futuro debe ir acompañado de una medida de dispersión entre proyecciones. Por ello, los rangos del Cuadro 2 indican la dispersión que existe entre escenarios generados con diversos modelos del clima que se obtienen para un mismo escenario de emisiones de GEI. Por ejemplo, existen modelos cuyas proyecciones, bajo un escenario de emisiones A2, proyectan un aumento de temperatura de 5.4°C, mientras que otros indican que la temperatura aumentará en sólo 2.0°C para finales del presente siglo.

## CUADRO 2. CALENTAMIENTO MEDIO GLOBAL PROYECTADO PARA LA SUPERFICIE E INCREMENTO EN EL NIVEL DEL MAR PARA FINALES DEL SIGLO XXI

Caso	Cambio de temperatura (°C a 2090 – 2099 relativo a 1980 – 1999) <sup>a</sup>		Aumento en el nivel del mar (m a 2090 – 2099 relativo a 1980 – 1999)
	Ensamble	Rango probable	Rango basado en modelos, se excluyen los cambios rápidos, dinámicos futuros en el flujo de hielo
Concentraciones con emisiones de GEI como en el año 2000 <sup>b</sup>	0.6	0.3 – 0.9	NA
Escenario B1	1.8	1.1 – 2.9	0.18 – 0.38
Escenario A1T	2.4	1.4 – 3.8	0.20 – 0.45
Escenario B2	2.4	1.4 – 3.8	0.20 – 0.43
Escenario A1B	2.8	1.7 – 4.4	0.21 – 0.48
Escenario A2	3.4	2.0 – 5.4	0.23 – 0.51
Escenario A1FI	4.0	2.4 – 6.4	0.26 – 0.59

Notas: <sup>a</sup> Estos cálculos se evalúan a partir de una jerarquía de modelos que abarca un modelo sencillo de clima, varios Modelos de Sistemas Terrestres de Complejidad Intermedia (EMIC), y una gran cantidad de Modelos de Circulación General Atmósfera-Océano (MCMAO). <sup>b</sup> La composición constante para el año 2000 se deriva solamente de MCMAO. Fuente: IPCC, 2007

Las pérdidas en la masa de los glaciares, casquetes de hielo y el manto de hielo en Groenlandia es consecuencia de que el derretimiento será mayor que la cantidad de nieve que caerá. Por tanto, el agua superficial resultante del derretimiento podría unirse a un sistema de desagüe subglaciar que lubricaría el flujo de hielo; esto a su vez causará una aceleración en el flujo y la descarga de hielo, y podría aumentar la contribución al nivel del mar. En la Antártida Occidental se han producido grandes aceleraciones de flujos de hielo y reducción en la plataforma de hielo debido al calentamiento del océano, y por tanto se deduce que los futuros calentamientos podrían causar una pérdida más rápida de masa y un mayor incremento en el nivel del mar.

## 6. CONCLUSIONES

1. Las concentraciones atmosféricas actuales de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> y su forzamiento radiativo positivo asociado, superan en exceso a aquellas identificadas a partir de las mediciones de los testigos de hielo de los últimos 650.000 años.
2. El uso de combustibles fósiles, la agricultura y el cambio de uso de suelo han sido las principales causas de los aumentos de gases de efecto invernadero de los últimos 150 años.
3. Las emisiones anuales de CO<sub>2</sub> debidas a la quema de combustible fósil, la producción de bienes como el cemento y la quema de gas aumentaron significativamente durante la segunda mitad del siglo XX. Los procesos naturales de absorción de CO<sub>2</sub> de los océanos y la biósfera terrestre eliminan aproximadamente de un 50% a 60% de las emisiones antropogénicas. La absorción de los océanos y la biósfera terrestre tiene una magnitud similar durante los últimos decenios pero la de la biósfera terrestre es más variable.

4. De acuerdo con los cálculos más recientes respecto al forzamiento antropogénico combinado debido a los gases de efecto invernadero, los aerosoles y los cambios en la superficie de la tierra, es *extremadamente probable* que las actividades humanas hayan ejercido una importante influencia neta en el calentamiento del clima desde 1750.
5. Las tasas de calentamiento superficial aumentaron a mediados de la década de los 70 y la superficie terrestre mundial se calienta a aproximadamente el doble de la tasa de calentamiento de la superficie oceánica desde esa época.
6. De 1900 a 2005 se observaron tendencias de cambio en la cantidad de precipitación. En particular, se observa una mayor intensificación de los patrones de precipitación y una mayor cantidad de eventos extremos.
7. Desde la década de los 70 las sequías son comunes, principalmente en los trópicos y subtropicos.
8. La cantidad de hielo sobre la Tierra disminuye. Así, desde finales del siglo XIX se ha producido una masiva retirada de los glaciares de montaña. La tasa de pérdida de masa de los glaciares y del manto de hielo de Groenlandia sigue aumentando.
9. La temperatura mundial (o el contenido de calor) oceánico ha aumentado desde 1955.
10. El nivel medio mundial del mar aumentó durante el siglo XX. Así, existe una confianza alta en que la tasa de incremento en el nivel del mar se elevó entre mediados de los siglos XIX y XX. Además, en el período de 1993 a 2003, el nivel del mar aumentó más rápido que durante el período de 1961 a 2003. Esta tasa de cambio en el nivel del mar durante los últimos decenios no ha sido geográficamente uniforme.
11. Desde 1750 aumentó la acidez de la superficie oceánica a raíz de la absorción de CO<sub>2</sub> antropogénico.
12. Los supuestos de distintos escenarios o las sensibilidades de diferentes modelos afectan ligeramente a las proyecciones de calentamiento global aunque en general corresponden a las observadas durante los últimos decenios. Así, se estima que la temperatura media para finales del siglo XXI aumentará entre 0.3°C y 6.4°C dependiendo del escenario de emisiones de GEI considerado.
13. Las pautas geográficas de calentamiento proyectado muestran mayores aumentos de temperatura en latitudes altas septentrionales y en el continente, con un menor calentamiento en los océanos meridionales y el Atlántico Norte.
14. Los cambios en las precipitaciones muestran pautas sólidas a gran escala, donde las precipitaciones aumentan en zonas tropicales, disminuyen en los subtropicos y aumentan en latitudes altas debido a una intensificación general del ciclo hidrológico mundial.
15. A medida que se calienta el clima, disminuye la cubierta de hielo y nieve; los glaciares y los casquetes de hielo pierden masa y contribuyen al aumento en el nivel del mar. La extensión del hielo marino disminuirá en el siglo XXI, tanto en el Ártico como la Antártida. La retroalimentación positiva en diversos procesos acelerará la reducción de la capa de nieve y en la mayoría de las regiones de permafrost aumentará la profundidad del derretimiento.
16. El calentamiento futuro reducirá la capacidad del sistema de la Tierra (tierra y océano) de absorber CO<sub>2</sub> antropogénico. Como resultado de ello, una extensa fracción creciente de CO<sub>2</sub> antropogénico permanecerá en la atmósfera bajo un clima más cálido. Esta retroalimentación requiere reducciones adicionales en las emisiones acumuladas para la estabilización a un nivel de CO<sub>2</sub> atmosférico dado. De este modo, mientras más alto sea el escenario de estabilización mayor impacto climático y por tanto mayor necesidad de reducciones.



## 1.2. EL CAMBIO CLIMÁTICO EN MÉXICO: EVIDENCIA Y PROYECCIONES

### Puntos fundamentales

La evidencia científica muestra que el incremento futuro de las concentraciones atmosféricas de gases efecto invernadero producirá un incremento de la temperatura global (IPCC, 2007a). Las proyecciones a nivel global, bajo diferentes escenarios de concentraciones de GEI, indican que en este siglo se espera que la temperatura superficial aumentará con mayor probabilidad entre 1.8 y hasta 4.0 °C, con una media de 3°C y un rango de entre 1 y 6°C. Sin embargo, estas proyecciones presentan una fuerte heterogeneidad e incertidumbre por regiones. En efecto, la estimación a nivel regional de los impactos de un aumento de la temperatura es aun un problema de frontera que está acompañado de un alto nivel de incertidumbre. Así, por ejemplo, los escenarios regionales de temperatura y precipitación futura del IPCC-AR4 (IPCC, 2007a) corresponden a proyecciones en las que el concepto regional se refiere a extensiones de nivel casi continental, como Norte América, Europa o África. Con tal resolución espacial es difícil pasar a la definición de acciones de adaptación para una cuenca o ecosistema particular o de impactos climáticos específicos por países o regiones. No obstante, existen en la actualidad diversos métodos para identificar y proyectar la temperatura y la precipitación a nivel regional.

De este modo, se utilizaron diversos métodos para simular las trayectorias climáticas para México. Así, la metodología de series de tiempo, que representa un piso de las proyecciones, indica que se espera que en todas los Estados del país se presente un aumento en la temperatura media aunque con diferencias significativas. Por ejemplo, hacia el 2050, el incremento podría ubicarse entre 0.2°C a 1.0°C respecto a la temperatura observada de 1990 a 2007, en tanto que hacia el 2100 el aumento en temperatura podría alcanzar, como media, hasta 1.6°C respecto al periodo base. Estos valores son muy conservadores en la medida en que sólo extrapolan las tendencias recientes.

En una visión de largo plazo, utilizando modelos de circulación general, se observa que prácticamente en todas las realizaciones para el 2100, con referencia al principio del siglo XX, muestran un cambio positivo en la temperatura media, aunque con diferencias estatales significativas y con el mayor aumento en el norte y noroeste de México. Por ejemplo, en el escenario A2, el cambio en temperatura media se proyecta entre 2.5 y 4.0°C, siendo el noroeste de México donde se esperan los mayores aumentos. En el escenario A1B se reporta un aumento promedio de entre 1.5 y 3.0°C. En el escenario B1, el aumento de temperatura en México será de entre 1 y 2°C.

Los escenarios de precipitación muestran una gran dispersión entre modelos y en términos de la variación porcentual. Destaca que bajo el escenario A2, los estados del norte muestran una disminución porcentual importante de hasta un -15%. En el escenario A1B la reducción en precipitación podría ser de -8.7%. La dispersión entre escenarios de hasta 45% indica que existen diversos modelos que proyectan incrementos de precipitación de hasta 10%. Por esta razón, existe una mayor incertidumbre en la dirección de cambio de la precipitación.

Así, las proyecciones climáticas sugieren un aumento de la temperatura media que se ubicará durante el siglo XXI para México entre 2 y 4°C aproximadamente, con una media de 3°C.



## 1. INTRODUCCIÓN

El clima terrestre es producto de la constante y compleja interacción entre la atmósfera, los océanos, las capas de hielo y nieve, los continentes y de la vida en el planeta en general (Conde, 2006). En este contexto, la temperatura juega un papel muy importante en las condiciones del clima, regulando los niveles de evaporación y transpiración (Flower, *et al.* 2007; Ekström, *et al.*, 2005), así como otros procesos asociados como el ciclo hidrológico y la radiación que absorbe la superficie de la tierra. Las formas de la variabilidad del clima son múltiples y en consecuencia el realizar un pronóstico sobre dicha variabilidad resulta una tarea en extremo compleja (Landa, *et al.*, 2008) y más aun para regiones específicas. La naturaleza no lineal del sistema climático hace que cualquier proyección del clima sea altamente sensible a las condiciones iniciales por lo que un pronóstico de largo plazo, determinístico es imposible. Es por ello que la estrategia de proyectar el clima futuro consiste en realizar numerosos experimentos con diversos modelos y desde diferentes condiciones iniciales, y analizar las respuestas del clima en un cierto rango. El que las proyecciones del clima se agrupen alrededor de un cierto valor depende de la importancia del forzamiento considerado. En el caso del cambio climático, el forzamiento radiativo, resultado de una mayor concentración de GEI, hace que las proyecciones de la temperatura se agrupen en el rango de aumentos del promedio global de entre 1 y 6°C; ello refleja las diferencias asociadas a la naturaleza caótica del clima. La dificultad en proporcionar un valor preciso del aumento en temperatura esperado ha conducido a presentar las proyecciones del clima en términos probabilísticos, en donde las mayores probabilidades se tienen en los rangos donde se ubican las proyecciones del mayor número de modelos. Es por ello que el IPCC (2007) en su Cuarto Informe de Evaluación pone énfasis en expresar las proyecciones en términos de probabilidades para obtener una medida de la confianza de los escenarios. Obviamente, la magnitud de los cambios en la temperatura o la precipitación dependerá del aumento de la concentración de GEI en el futuro y de las fuentes que originan estos gases; ello constituye, desde luego, una fuente adicional de incertidumbre en los escenarios de cambio climático.

Para identificar entonces los impactos del cambio climático en México se construyeron escenarios climáticos para el país y para los Estados tanto de temperatura como de precipitación, para cada escenario de emisiones y considerando los modelos usados por el IPCC en el Cuarto Informe de Evaluación. El objetivo de este capítulo es, entonces, presentar estos escenarios para México, ello, desde luego, debe considerar los niveles de incertidumbre que implica al pasar de proyecciones globales a proyecciones a escala regional o estatal.

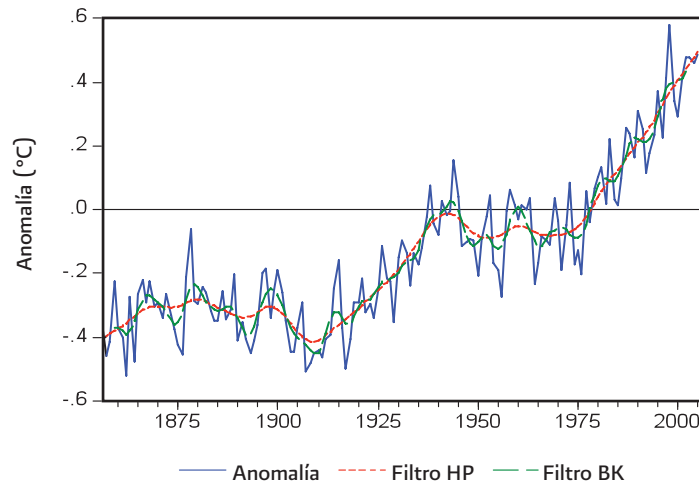
## 2. UNA PERSPECTIVA GLOBAL DEL CAMBIO CLIMÁTICO Y SU EXPRESIÓN REGIONAL

La evidencia científica argumenta que el incremento de las concentraciones atmosféricas de GEI producirá cambios en el clima del planeta, con diferencias regionales significativas (IPCC, 2007a). Los escenarios regionales presentados en el IPCC-AR4 (IPCC, 2007a) corresponden a proyecciones de temperatura y precipitación donde el concepto regional se refiere a extensiones de nivel casi continental y en donde destacan los siguientes resultados:

La temperatura superficial aumentará, con mayor probabilidad, entre 1.8 hasta 4.0°C, con una media de 3°C atendiendo a los valores ya alcanzados, es decir, aproximadamente, entre 0.06 y hasta 0.44°C de incremento por década. Ello está dentro del rango esperado de calentamiento que abarca de 0.3°C a 6.4°C con un rango más probable de entre 0.6°C a 4.0°C. Además, resulta particularmente preocupante que en los escenarios pesimistas la sensibilidad del cambio climático a las emisiones para ese siglo se ubique entre 2 y 4.5°C (IPCC, 2007), donde es muy poco probable algún valor menor a 1.5°C y donde la densidad de probabilidad muestra que el valor superior a 4.5°C tiene colas mas densas (IPCC, 2007). Ello es consistente con las anomalías de la temperatura media del planeta (estimadas con base en el promedio de 1951 a 1980) presentadas en la Gráfica 11.



Gráfica 11. Anomalía de temperatura media (°C)



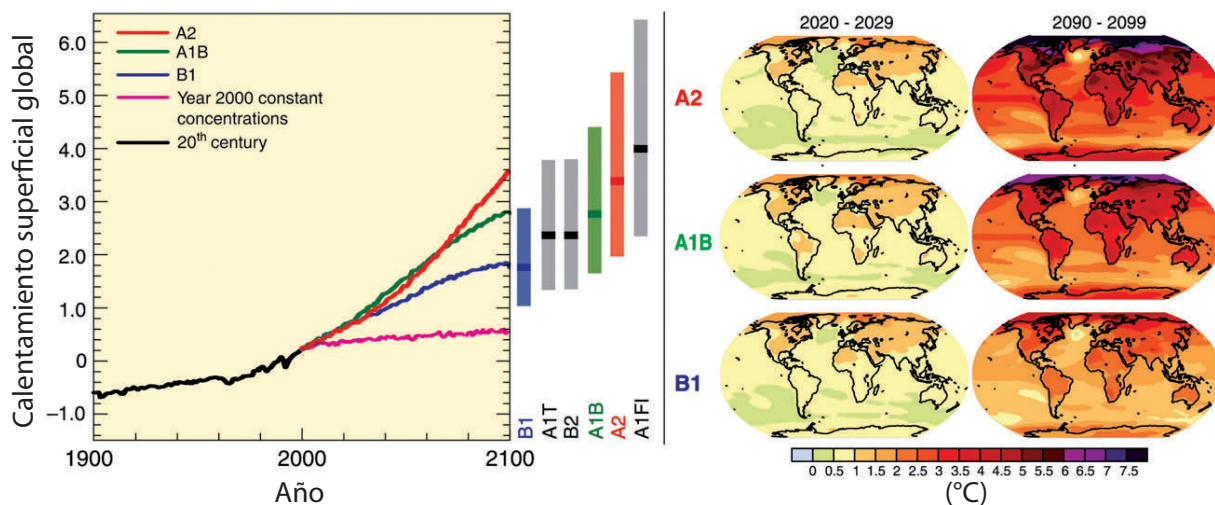
Fuente: datos de la NASA, usando estaciones meteorológicas terrestres considerando de 1880 a 2007.

La anomalía fue calculada respecto a la media de 1951-1980

Nota: Filtro HP = filtro Hodrick-Prescott; Filtro BK = filtro Baxter-King.

- Las pautas geográficas de calentamiento proyectado muestran aumentos superiores de temperatura en latitudes altas septentrionales y en tierra, con un menor calentamiento en los océanos meridionales y el Atlántico Norte (Figura 2) pero con un alto nivel de incertidumbre.

Figura 2. Proyecciones de aumento en la temperatura superficial

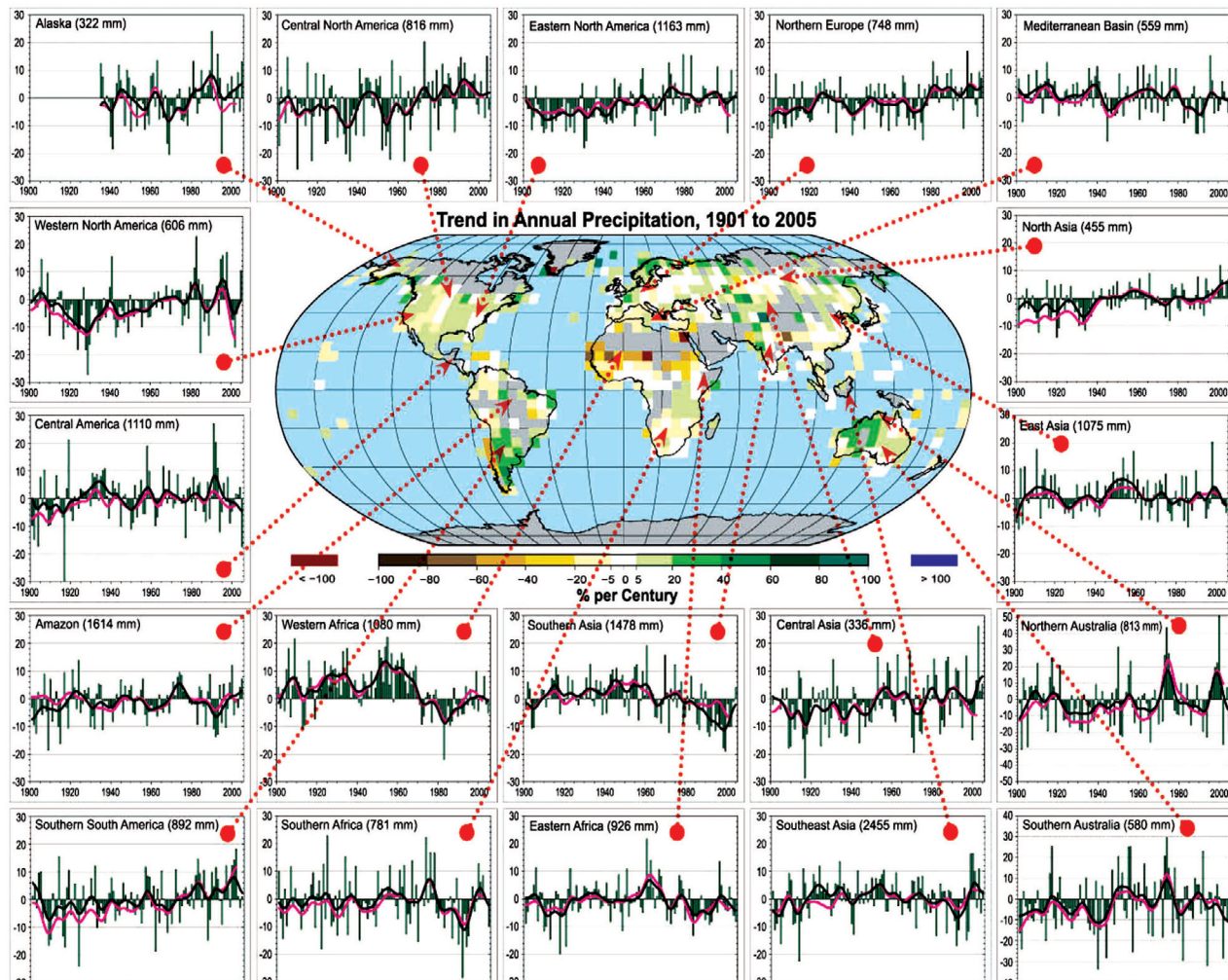


Fuente: IPCC (2007).

Nota; en la imagen de la izquierda se muestran las trayectorias de aumento de temperatura promedio global para distintos escenarios de emisiones de GEI. En la imagen de la derecha se tiene la representación espacial del aumento de la temperatura en distintas regiones del planeta bajo tres escenarios de emisiones de GEI

- En el periodo de 1979-2005 se ha registrado una anomalía en los niveles de precipitación en distintas regiones del planeta (Figura 3). De seguir este patrón en el presente siglo, se podría esperar un incremento en la precipitación en las latitudes altas del hemisferio norte y un decremento de la precipitación en las latitudes medias, zonas tropicales y subtropicales. Es muy probable que aumente la frecuencia de los valores extremos, de las olas de calor y de las precipitaciones intensas. Así, según una franja de modelos, es probable que en el futuro los ciclones tropicales (tifones y huracanes) sean más intensos con máximos más acentuados de la velocidad del viento y mayor abundancia de precipitaciones intensas; todo ello vinculado al constante aumento de la temperatura superficial de los mares tropicales (IPCC, 2007).

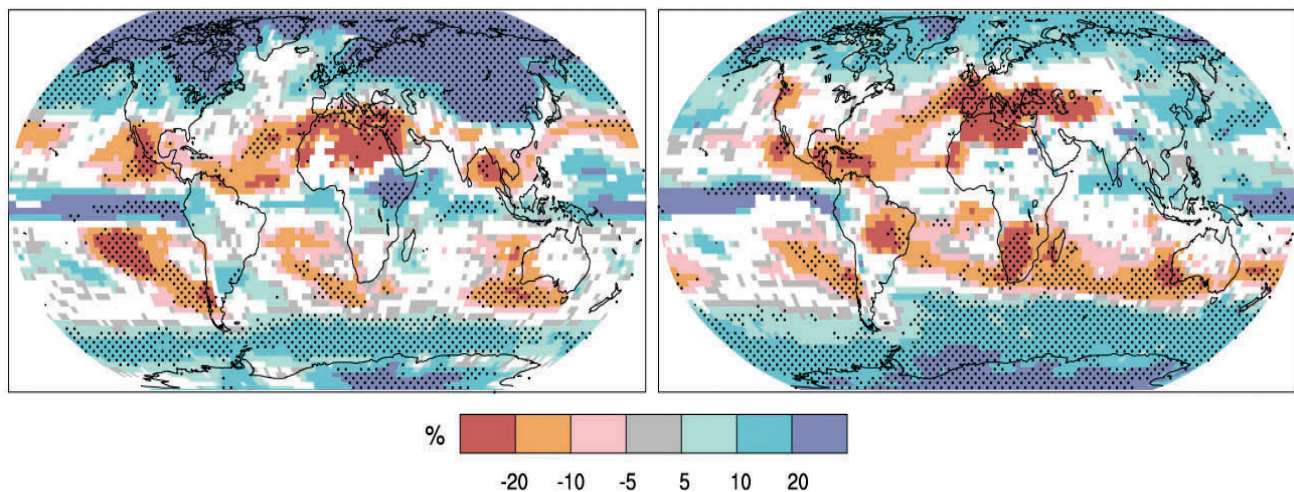
**Figura 3. Tendencia de la precipitación en el siglo XX por región del mundo (milímetros)**



Fuente: IPCC (2007<sup>a</sup>)

- Es muy probable, bajo el escenario A1B, que aumente la precipitación en latitudes altas y disminuya hasta un 20% hacia finales del presente siglo en las regiones terrestres subtropicales (Figura 4). Asimismo, casi todas las proyecciones reportan un aumento en las precipitaciones en la mayor parte de América del Norte Septentrional y una disminución en América Central, Europa Meridional y en el África Mediterránea con una transición hacia un aumento de las precipitaciones en Europa Septentrional (Figura 4). Los modelos usados por el IPCC también proyectan un aumento de las precipitaciones en gran parte de Asia Septentrional. Algunas partes de México, del Mediterráneo, de Australia, del sur de África y de Chile están entre aquellas en las que se esperan disminuciones en la precipitación total anual.

**Figura 4. Proyecciones de precipitación a nivel mundial del IPCC**



Fuente: IPCC (2007)

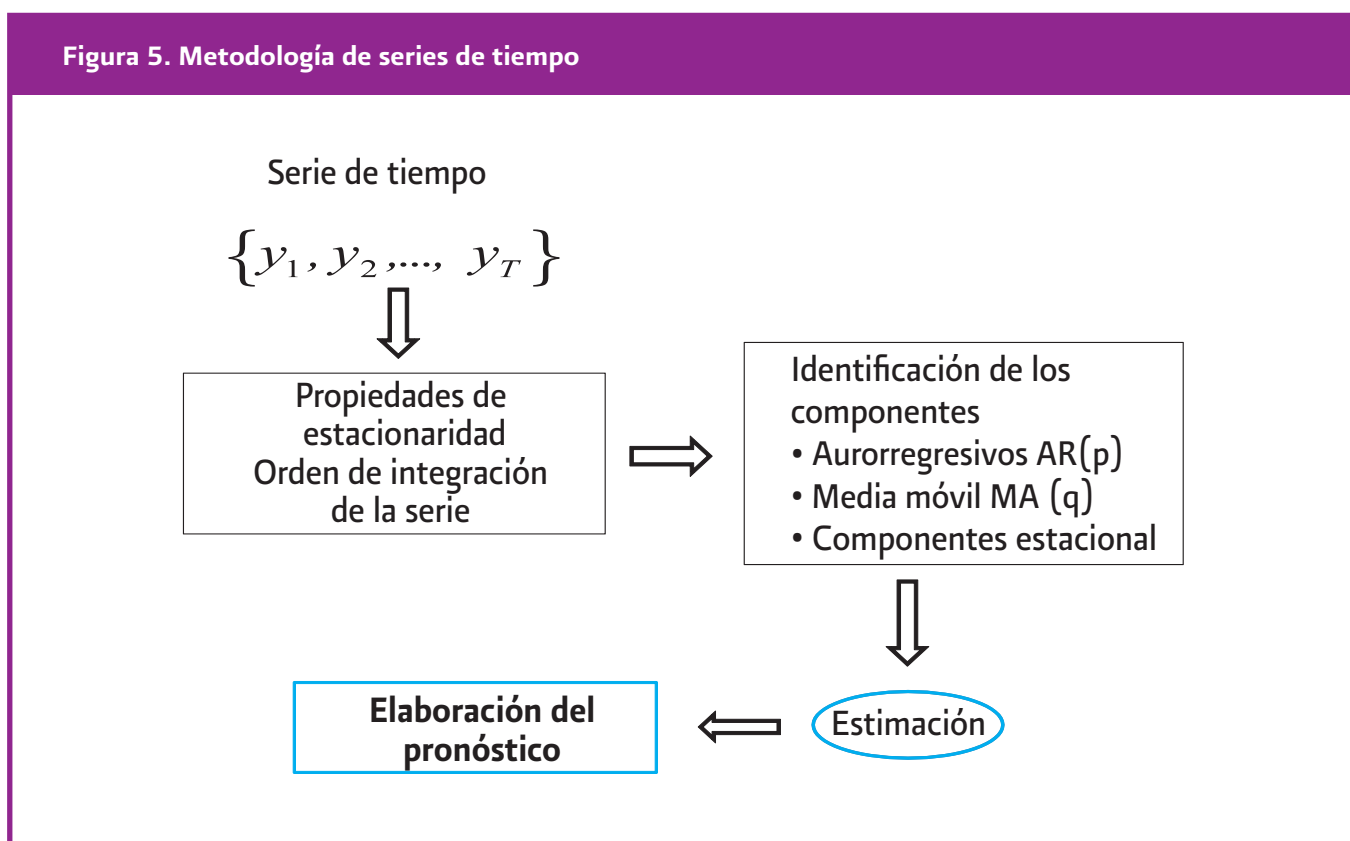
Nota: Cambios en la precipitación de invierno y verano relativo (en valores porcentuales) para el período 2090-2099, respecto del período 1980-1999. Los valores son promedios multimodelo basados en el escenario A1B.

### 3. ESCENARIOS DE TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN PARA MÉXICO

Las proyecciones climáticas deben de tomarse con precaución ya que los cambios en el clima son producto de variaciones en los procesos climáticos internos, como inestabilidades en la atmósfera y/o el océano o de forzamientos externos, como variaciones en la actividad solar, la temperatura de superficie del mar o cambios en el uso de suelo o en la composición de la atmósfera (forzamiento radiativo por incremento en GEI). En este sentido, los modelos físicos sirven para construir escenarios climáticos que permitan diferenciar el impacto del cambio climático de un estado base de referencia. El concepto de escenario no debe confundirse sin embargo con la realización de un pronóstico específico ya que el objeto de cada uno de ellos es diferente, así como las causas, el manejo y comunicación de la incertidumbre apropiados en cada caso. De acuerdo con el IPCC, los escenarios climáticos se definen entonces como “una representación posible y simplificada del clima futuro, basada en un conjunto de relaciones climatológicas que ha sido construida expresamente para investigar las posibles consecuencias del cambio climático antropogénico, y que en muchas ocasiones sirve como materia prima para modelos de impacto” (IPCC, 2007). Un escenario de cambio climático se define entonces como la diferencia entre un escenario climático y el clima observado actualmente.

En contraste, un pronóstico climático tiene por objeto estimar la evolución verdadera del clima en el futuro (ya sea en escalas estacional, interanual o de largo plazo) y es altamente dependiente de las condiciones iniciales que se asuman y por lo tanto normalmente tienen un carácter probabilístico. En este sentido, en este estudio se construyeron escenarios climáticos para buscar identificar los impactos potenciales.

Así, el análisis de las tendencias climáticas en México es desde luego un tema esencial en el estudio del cambio climático para el país (Estrada, *et al.*, 2008; Conde, *et al.*, 2008; Magaña, 2004, 1999, 1998; Magaña y Zermeño, 2008). Existen diversos métodos para proyectar el clima, en donde destacan el uso de algunas técnicas estadísticas y econométricas (Jones, 1994 y Parker, *et al.*, 1994) y el uso de los Modelos de Circulación General (McGuffie y Henderson-Sellers, 2005). El uso de los modelos de series de tiempo permite identificar tendencias de largo plazo, la posible presencia de raíces unitarias y de comportamientos cíclicos o estacionarios en la series de temperatura y precipitación aunque sus proyecciones resultan conservadoras en la medida en que sólo consideran información histórica (Harvey y Mills, 2003 y Harvey y Mills, 2003; Gil-Alana, 2008) (Figura 5).



Las pruebas econométricas, sintetizadas en el Cuadro 3, indican que es posible identificar la presencia de raíces unitarias en la evolución de la temperatura media nacional para el período 1980-2007 mientras que estas mismas pruebas de raíces unitarias para la precipitación indican resultados mixtos lo que refleja el mayor nivel de incertidumbre sobre su trayectoria futura (Meehl *et al.*, 2007)



### CUADRO 3. PRUEBAS DE RAÍCES UNITARIAS PARA LAS SERIES DE TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN

Variable	ADF			PP(3)			KPSS(5)	
	A	B	C	A	B	C	$\eta_{\mu}$	$\eta_{\tau}$
Prec	-5.469(0)	-4.400(0)	-0.897(1)	-5.489	-4.399	-0.440	0.448	0.072
$\Delta$ prec	-9.305(0)	-9.306(0)	-9.392(0)	-11.396	-11.245	-11.147	0.105	0.089
Temp	-8.528(0)	-7.341(0)	0.484(3)	-8.547	-7.455	0.098	0.567	0.163
$\Delta$ Temp	-9.483(2)	-9.575(2)	-9.619(2)	-21.408	-21.566	-21.694	0.085	0.084

Nota: Los valores en negrillas indican rechazo de la hipótesis nula al 5% de significancia. Los valores críticos al 5% para la prueba Dickey-Fuller Aumentada y Phillips-Perron, en una muestra de  $T = 100$ , son de -3.60 incluyendo constante y tendencia (modelo A), -2.98 únicamente la constante (modelo B) y -1.95 sin constante y sin tendencia (modelo C) (Maddala y Kim, 1998). Los valores entre paréntesis representan el número de rezagos utilizados en la prueba,  $\eta_{\mu}$  y  $\eta_{\tau}$  representan los estadísticos de prueba KPSS con constante y con constante y tendencia, donde la hipótesis nula considera que la serie es estacionaria en nivel o alrededor de una tendencia determinística, respectivamente. Los valores críticos al 5% en ambas pruebas son de 0.463 y 0.146 respectivamente (Kwiatkowski et al., 1992). Las letras minúsculas representan el logaritmo de las series. Período 1980-2008.

El conjunto de información permite entonces estimar modelos ARIMA para las series de temperatura y precipitación (Cuadros 4 y 5) para realizar los pronósticos correspondientes.

### CUADRO 4. MODELOS ARIMA, MODELOS DE SERIES DE TIEMPO TEMPERATURA MEDIA

ESTADO	C	T	AR		MA			
Nacional			AR(3)			MA(3)		
	18.82 (0.00)	0.03 (0.07)	0.90 (0.00)			-0.96 (0.00)		
Aguascalientes			AR(4)					
	16.75 (0.00)	0.01 (0.01)	0.28 (0.02)					
Baja California			AR(4)			MA(6)		
	21.32 (0.00)	0.01 (0.03)	0.30 (0.02)			0.30 (0.03)		
Baja California Sur			AR(2)			MA(3)		
	25.93 (0.00)	0.006 (0.01)	-0.54 (0.00)			0.95 (0.00)		
Campeche			AR(2)	AR(7)		MA(2)		
	25.08 (0.00)	0.01 (0.00)	-0.59 (0.00)	-0.25 (0.01)		0.50 (0.02)		
Coahuila			AR(2)	AR(3)	AR(4)	MA(2)	MA(3)	MA(4)
	19.11 (0.00)	0.01 (0.03)	-0.24 (0.08)	0.19 (0.01)	0.63 (0.00)	0.20 (0.05)	-0.32 (0.00)	-0.76 (0.00)
Colima			AR(4)			MA(4)		
	21.11 (0.00)	0.02 (0.00)	0.73 (0.00)			-0.94 (0.00)		
Chiapas			AR(2)	AR(7)		MA(2)		
	25.82 (0.00)	0.01 (0.00)	-0.60 (0.00)	-0.25 (0.02)		0.44 (0.07)		
Chihuahua			AR(3)			MA(3)		
	14.36 (0.00)	0.01 (0.00)	-0.68 (0.00)			0.94 (0.00)		
Distrito Federal			AR(3)			MA(1)	MA(3)	
	15.37 (0.00)	0.009 (0.00)	-0.51 (0.00)			-0.27 (0.00)	0.81 (0.00)	

## CUADRO 4. MODELOS ARIMA, MODELOS DE SERIES DE TIEMPO TEMPERATURA MEDIA (CONTINUACIÓN)

ESTADO	C	T	AR			MA		
Durango	18.21	0.01	AR(1)	AR(4)				
	(0.00)	(0.00)	(0.07)	(0.11)				
Guanajuato	15.07	0.007	AR(1)	AR(3)		MA(3)		
	(0.00)	(0.01)	(0.08)	(0.00)		(0.94)		
Guerrero	19.00	0.01	AR(2)					
	(0.00)	(0.00)	(0.09)					
Hidalgo	17.69	0.009	AR(2)	AR(3)		MA(1)	MA(2)	MA(4)
	(0.00)	(0.00)	(0.00)	(0.00)		(-0.50)	(1.04)	(0.47)
Jalisco	21.39	0.01	AR(1)	AR(2)	AR(4)	MA(1)	MA(2)	MA(4)
	(0.00)	(0.00)	(0.00)	(0.01)	(0.70)	(0.38)	(0.21)	(-0.82)
Estado de México	15.39	0.009	AR(3)			MA(3)		
	(0.00)	(0.01)	(0.00)			(0.93)		
Michoacán	17.50	0.01	AR(4)			MA(4)		
	(0.00)	(0.00)	(0.00)			(0.93)		
Morelos	18.83	0.01	AR(4)			MA(2)	MA(3)	MA(4)
	(0.00)	(0.00)	(0.03)			(-0.24)	(-0.20)	(-0.52)
Nayarit	21.62	0.01	AR(1)	AR(2)	AR(3)	MA(1)	MA(2)	MA(3)
	(0.00)	(0.00)	(0.00)	(0.00)	(0.83)	(-0.82)	(0.82)	(-0.95)
Nuevo León	22.15	0.009	AR(2)	AR(3)	AR(4)	MA(2)	MA(3)	
	(0.00)	(0.04)	(0.00)	(0.00)	(0.13)	(0.47)	(0.71)	
Oaxaca	22.45	0.008	AR(1)	AR(5)		MA(1)	MA(5)	
	(0.00)	(0.02)	(0.00)	(0.00)		(-0.91)	(0.38)	
Puebla	17.73	0.008	AR(1)	AR(5)		MA(2)	MA(5)	
	(0.00)	(0.00)	(0.01)	(0.00)		(-0.22)	(-0.77)	
Querétaro	15.33	0.01	AR(1)	AR(5)		MA(2)	MA(5)	
	(0.00)	(0.00)	(0.01)	(0.00)		(-0.19)	(-0.79)	
Quintana Roo	26.30	0.009	AR(1)	AR(2)	AR(3)	MA(1)	MA(2)	
	(0.00)	(0.00)	(0.00)	(0.00)	(0.39)	(-0.80)	(0.97)	
San Luis Potosí	15.02	0.009	AR(1)	AR(2)		MA(1)	MA(2)	
	(0.00)	(0.00)	(0.00)	(0.00)		(-0.77)	(0.99)	
Sinaloa	19.67	0.01	AR(1)	AR(2)	AR(3)	MA(1)	MA(2)	MA(3)
	(0.00)	(0.03)	(0.00)	(0.00)	(0.72)	(-1.22)	(1.36)	(0.69)
Sonora	22.02	0.01	AR(1)			MA(1)		
	(0.00)	(0.01)	(0.00)			(0.97)		
Tabasco	25.38	0.01	AR(7)			MA(3)		
	(0.00)	(0.00)	(0.02)			(-0.26)		

#### CUADRO 4. MODELOS ARIMA, MODELOS DE SERIES DE TIEMPO TEMPERATURA MEDIA (FINAL)

Tamaulipas			AR(3)			MA(3)		
	20.44 (0.00)	0.006 (0.07)	0.52 (0.11)			-0.69 (0.02)		
Tlaxcala			AR(1)	AR(3)	AR(4)	MA(2)	MA(5)	
	13.32 (0.00)	0.02 (0.52)	0.41 (0.00)	0.18 (0.13)	0.24 (0.08)	0.19 (0.19)	0.15 (0.27)	
Veracruz			AR(1)			MA(1)	MA(2)	
	22.17 (0.00)	0.02 (0.77)	0.92 (0.00)			-0.59 (0.00)	0.07 (0.69)	
Yucatán			AR(4)			MA(4)		
	26.50 (0.00)	0.008 (0.01)	-0.51 (0.00)			0.91 (0.00)		
Zacatecas			AR(4)			MA(1)		
	14.55 (0.00)	0.01 (0.00)	0.27 (0.03)			-0.21 (0.10)		

#### CUADRO 5. MODELOS DE SERIES DE TIEMPO PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL

ESTADO	C	AR			MA	ARCH	GARCH
Nacional		AR(1)	AR(3)				
	1040.89 0	0.186 -0.1	0.441 0				
Aguascalientes		AR(1)	AR(3)				
	535.13 0	0.38 -0.04	-0.36 -0.05				
Baja California		AR(1)	AR(2)				0.86
	176.18 0	0.23 -0.02	-0.27 -0.16				-0.01
Baja California Sur		AR(2)	AR(4)				
	223.73 0	-0.31 -0.09	-0.54 0				
Campeche		AR(4)			MA(1)		
	1276.59 0	0.3 -0.03			-0.29 -0.11	-0.17 -0.01	
Coahuila		AR(8)			MA(2)		
	359.8 0	-0.31 -0.28			0.2 -0.39	-0.37 -0.1	
Colima		AR(4)			MA(4)		
	894.27 0	-0.48 -0.06			0.87 0	-0.34 -0.03	
Chiapas		AR(1)	AR(2)				
	1869.03 0	0.5 0	-0.5 -0.01				
Chihuahua		AR(1)	AR(3)		MA(1)		
	560.81 0	0.34 -0.09	-0.41 -0.02		-0.99 0		
Michoacán		AR(4)			MA(1)		
	854.89 0	-0.44 0			-0.99 0		1.1 0

## CUADRO 5. MODELOS DE SERIES DE TIEMPO PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL (CONTINUACIÓN)

ESTADO	C	AR			MA	ARCH	GARCH
Distrito Federal		AR(2)	AR(4)				
	790.38	-0.43	-0.39				0.77
	0	0	-0.02				-0.08
Durango		AR(1)	AR(3)				
	345.02	0.32	0.57			-0.3	
Guanajuato		AR(4)			MA(6)		
	589.76	-0.44			-0.72		1.21
	0	-0.14			0		0
Guerrero		AR(1)	AR(2)	AR(3)			
	1156.31	0.02	-0.45	0.28		-0.23	
	0	-0.94	-0.05	-0.1		-0.05	
Hidalgo		AR(4)			MA(3)		
	683.9	-0.2			-0.46		0.52
	0	-0.35			-0.04		-0.07
Jalisco		AR(2)	AR(3)		MA(1)		
	824.52	-0.37	-0.61		-0.28	-0.29	1.11
	0	-0.05	-0.01		-0.12	-0.09	0
Estado de México		AR(1)			MA(4)		
	879.85	-0.45			-0.9		1.23
	0	-0.02			0		-0.01
Michoacán		AR(4)			MA(1)		
	854.89	-0.44			-0.99		1.1
	0	0			0		0

Morelos		AR(2)			MA(4)		
	969.39	-0.01			-0.72	-0.46	1.02
	(0.00)	(0.98)			(0.00)	(0.11)	(0.00)
Nayarit		AR(3)			MA(4)		
	1228.16	-0.49			0.34	-0.20	
	(0.00)	(0.00)			(0.15)	(0.00)	
Nuevo León		AR(1)			MA(5)		
	497.85	0.78			0.84		1.14
	(0.00)	(0.00)			(0.00)		(0.00)
Oaxaca		AR(2)	AR(6)		MA(3)		
	1273.23	0.31	-0.47		0.43		
	(0.00)	(0.07)	(0.01)		(0.09)		
Puebla		AR(1)	AR(4)		MA(4)		
	1032.40	0.58	-0.37		0.98		
	(0.00)	(0.00)	(0.00)		(0.00)		
Querétaro		AR(3)			MA(4)		
	535.31	-0.54			-0.87		1.08
	(0.00)	(0.00)			(0.00)		(0.00)
Quintana Roo		AR(5)			MA(5)		
	1246.15	0.41			-0.86		
	(0.00)	(0.02)			(0.00)		
San Luis Potosí					MA(4)		
	823.53				0.89		
	(0.00)				(0.00)		
Sinaloa		AR(7)			MA(1)		
	580.00	0.62			-0.40		
	(0.00)	(0.00)			(0.07)		

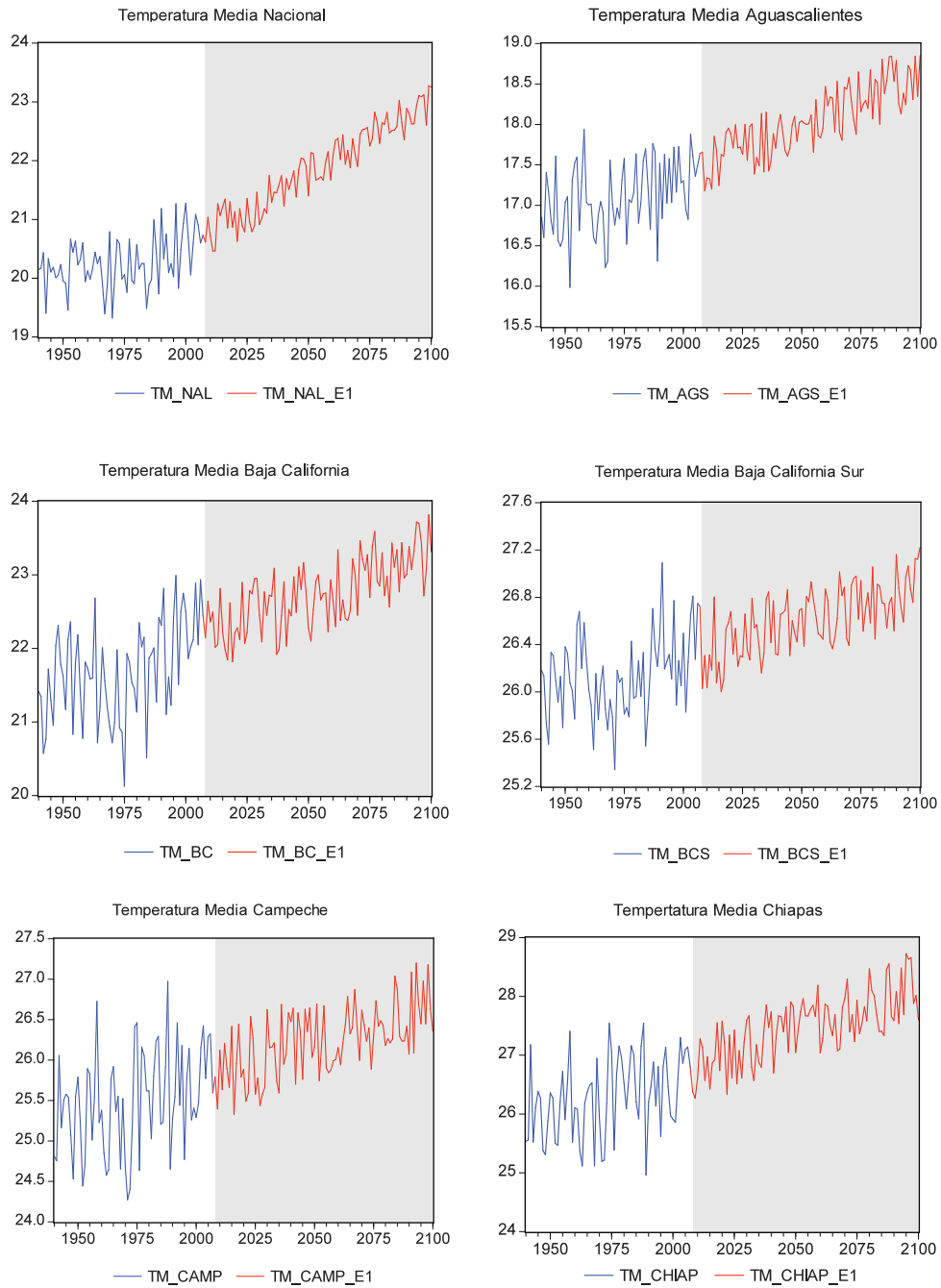


## CUADRO 5. MODELOS DE SERIES DE TIEMPO PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL (FINAL)

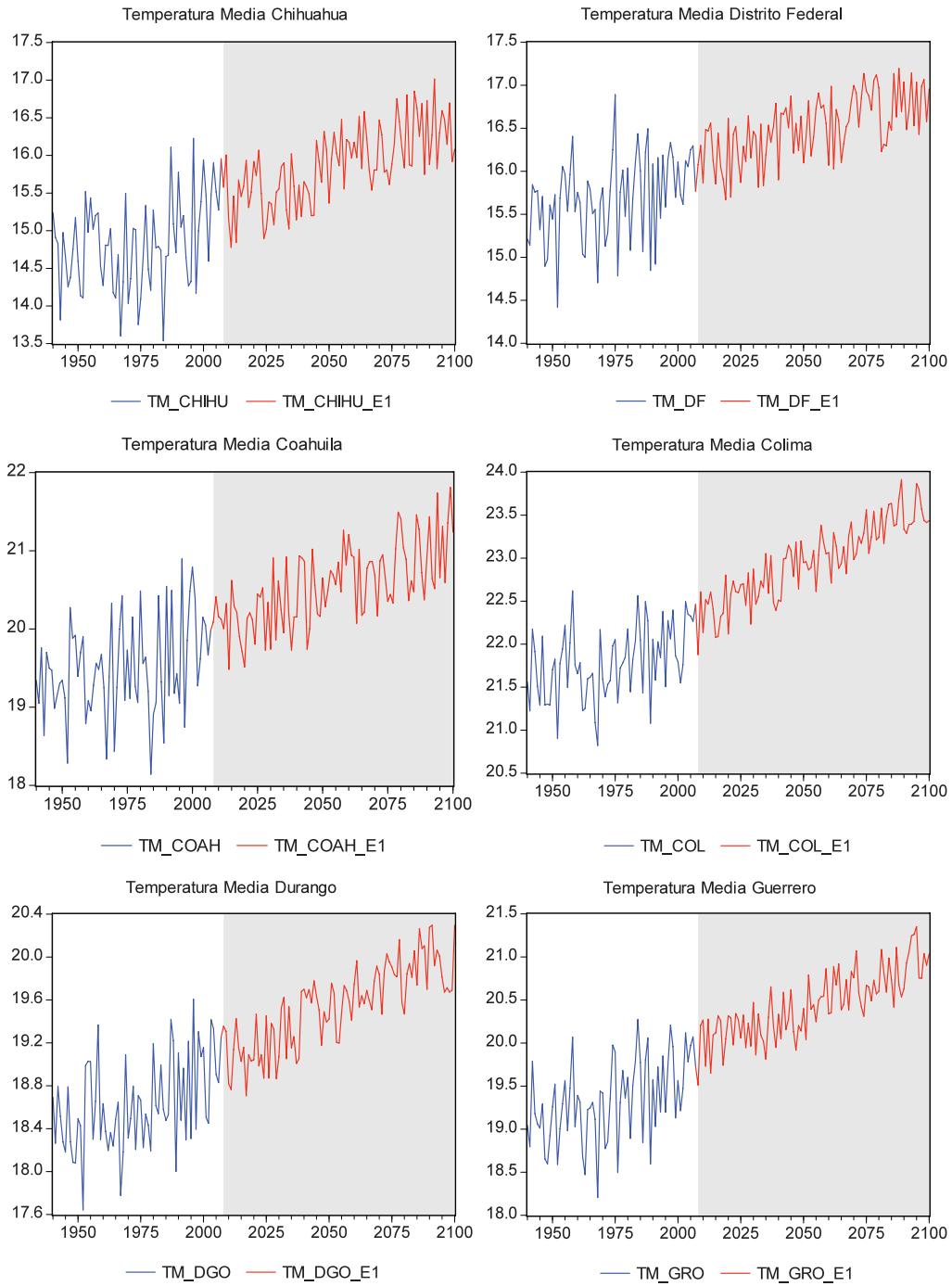
Sonora		<b>AR(7)</b>			<b>MA(3)</b>		
	383.14 (0.00)	0.19 (0.15)			0.96 (0.00)		1.00 (0.00)
Tabasco		<b>AR(5)</b>			<b>MA(5)</b>		
	2099.76 (0.00)	-0.41 (0.07)			0.75 (0.00)		1.10 (0.00)
Tamaulipas		<b>AR(1)</b>	<b>AR(3)</b>		<b>MA(1)</b>		
	778.25 (0.00)	0.41 (0.04)	-0.41 (0.02)		-0.93 (0.00)		0.85 (0.04)
Tlaxcala		<b>AR(4)</b>			<b>MA(4)</b>		
	703.92 (0.00)	0.22 (0.70)			-0.48 (0.35)	-0.24 (0.05)	1.03 (0.00)
Veracruz		<b>AR(10)</b>			<b>MA(1)</b>		
	1558.80 (0.00)	-0.55 (0.00)			-1.26 (0.00)		0.88 (0.00)
Yucatán		<b>AR(3)</b>			<b>MA(2)</b>		
	1032.23 (0.00)	-0.49 (0.01)			0.92 (0.00)		
Zacatecas		<b>AR(1)</b>	<b>AR(3)</b>				
	491.22 (0.00)	0.38 (0.05)	-0.34 (-0.07)				

El conjunto de esta información permite entonces simular con base en la información histórica la evolución futura en donde se observa claramente este incremento continuo en la temperatura y una relativa incertidumbre en precipitación (Gráficas 12 y 13).

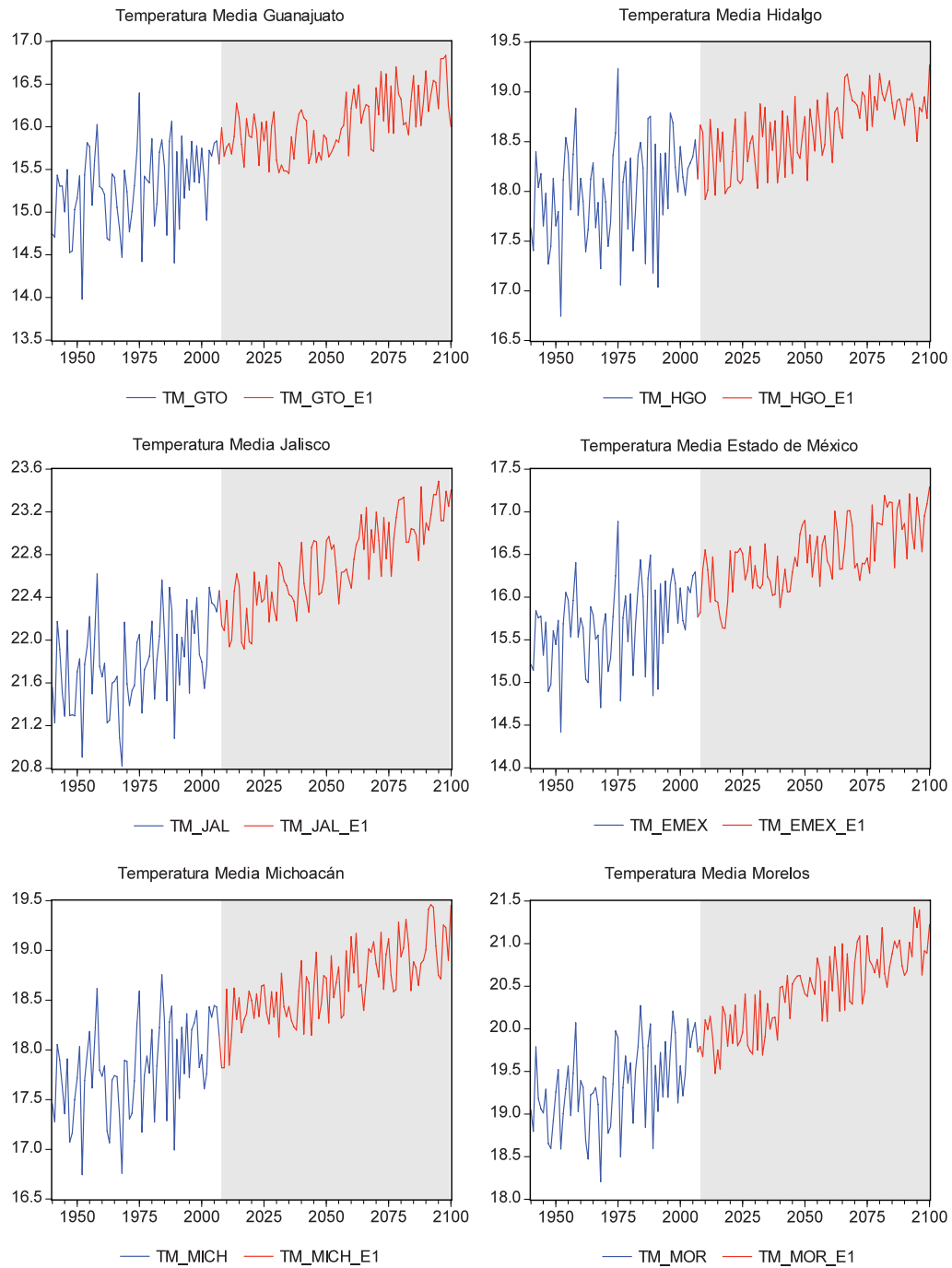
## Gráfica 12. Pronósticos de la temperatura media por Estado 2008-2100



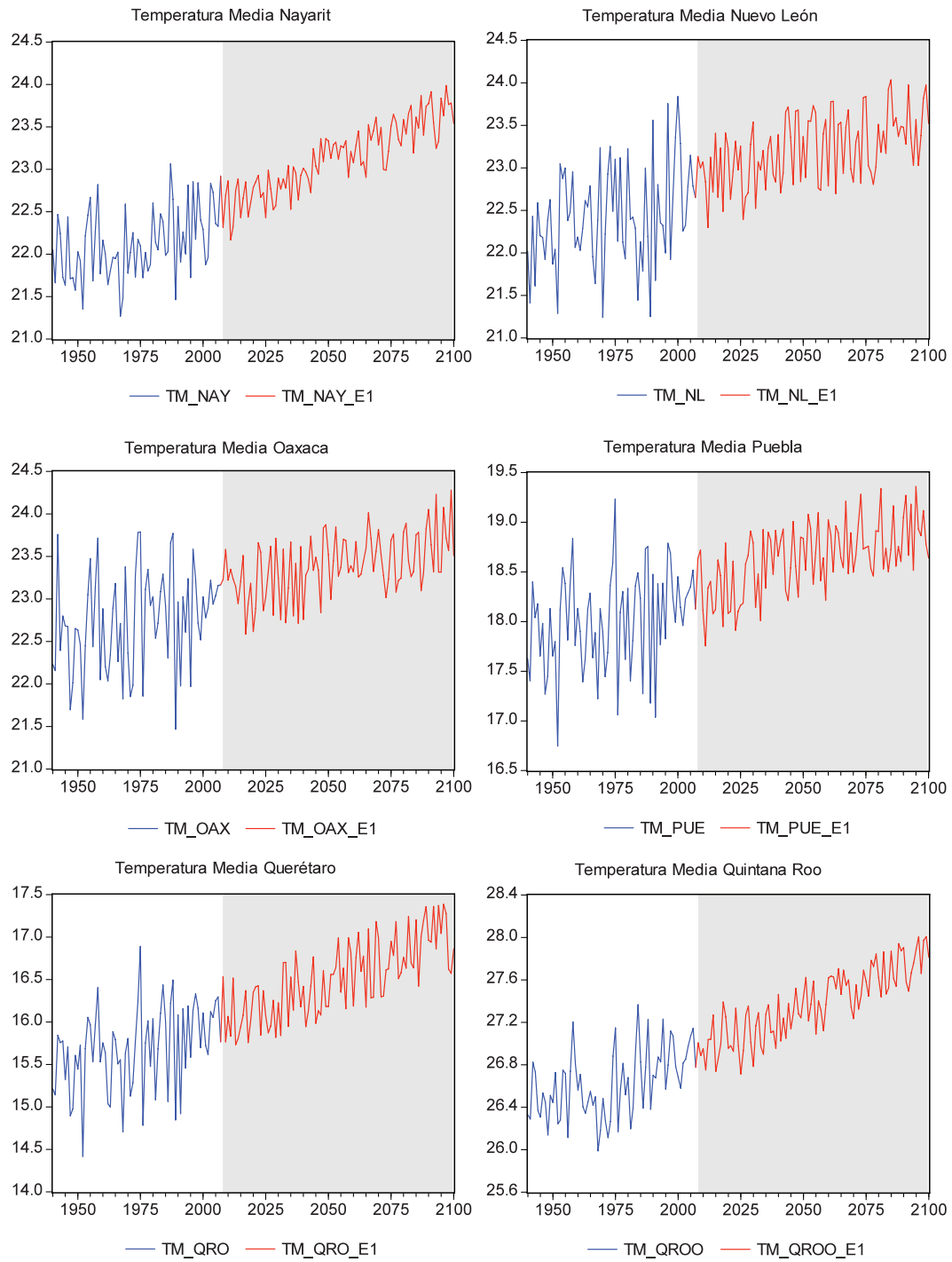
Gráfica 12. Pronósticos de la temperatura media por Estado 2008-2100 (Continuación)



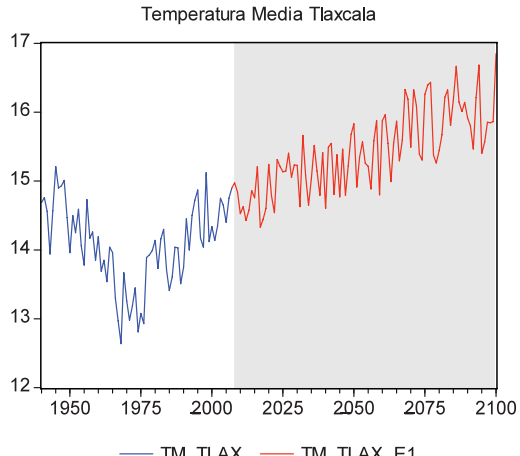
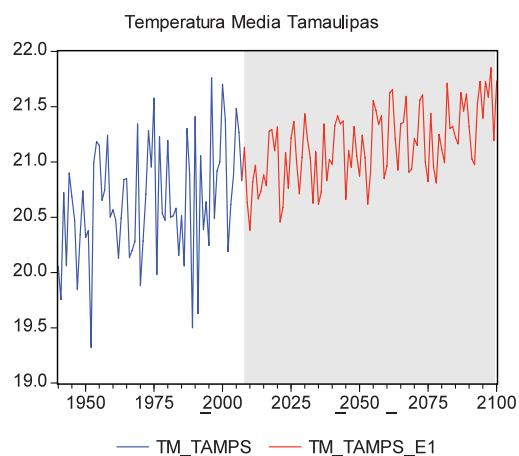
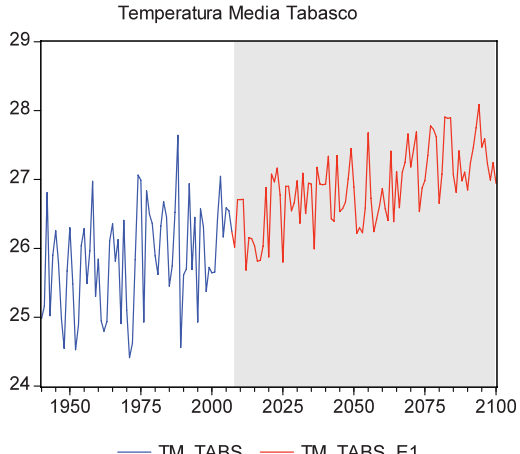
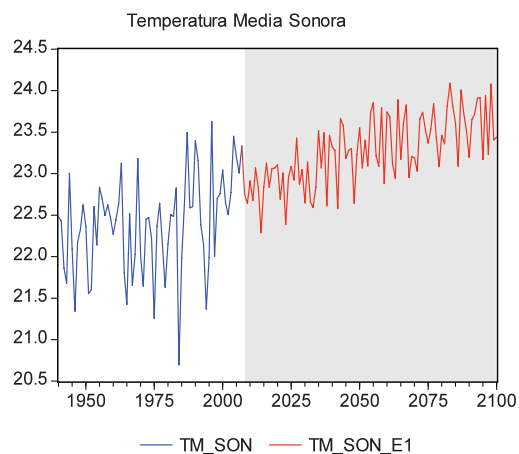
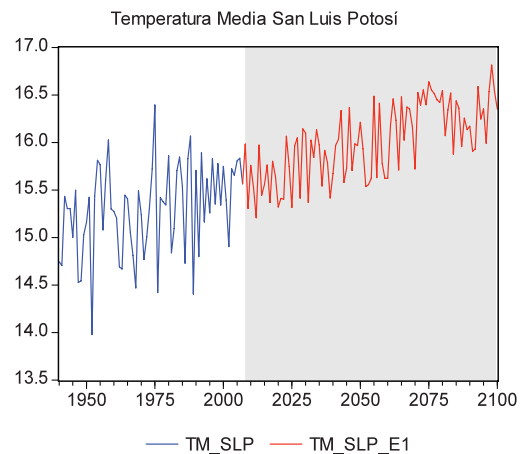
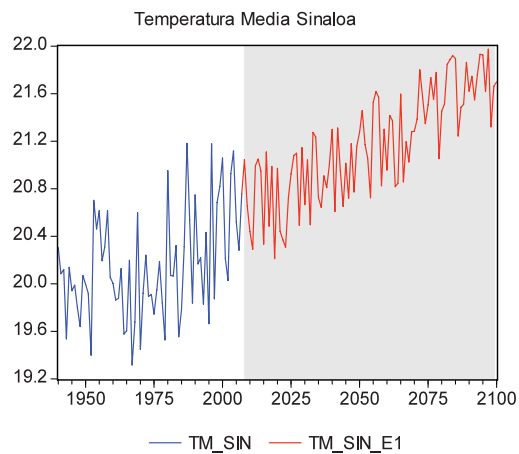
## Gráfica 12. Pronósticos de la temperatura media por Estado 2008-2100 (Continuación)



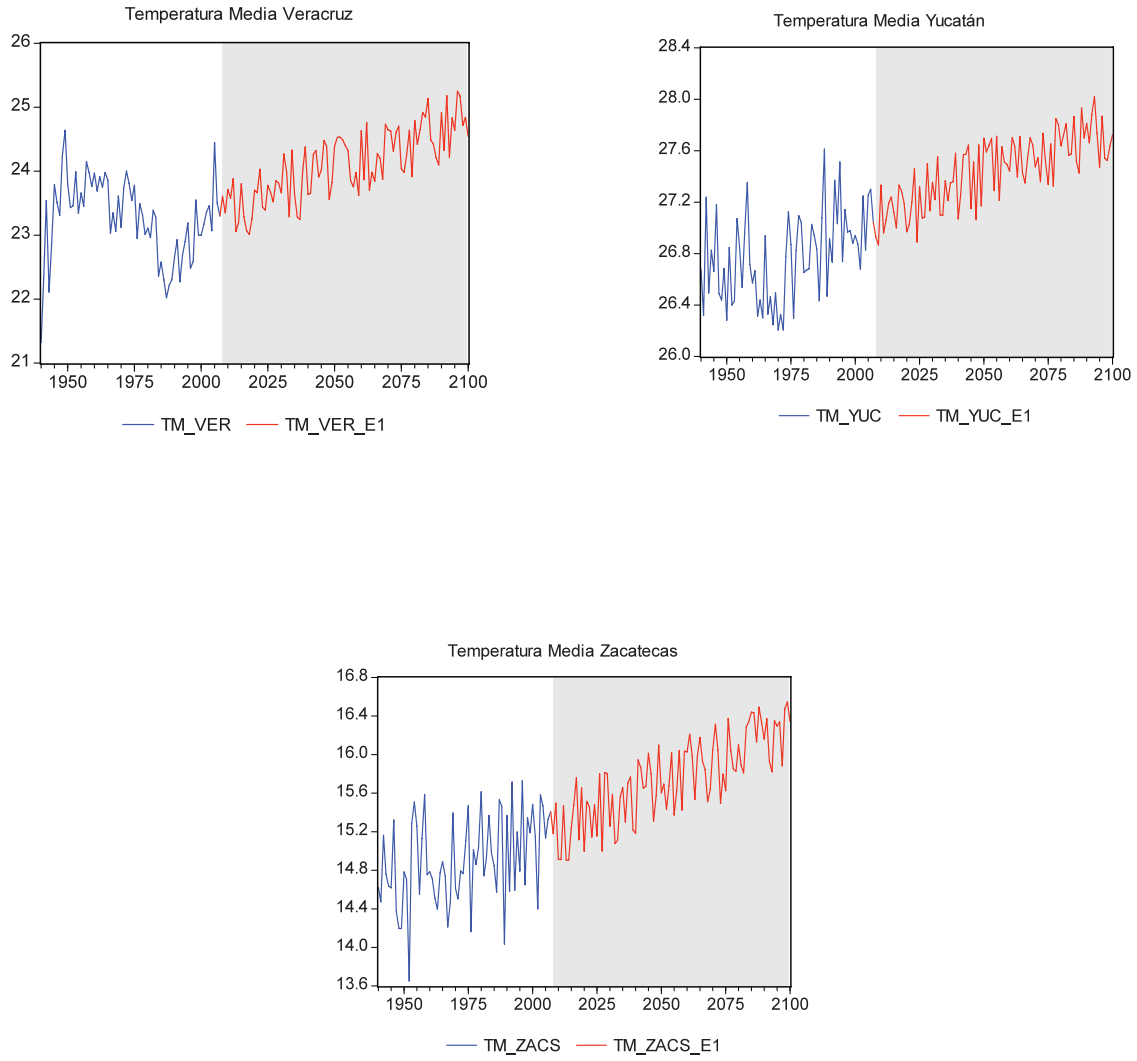
## Gráfica 12. Pronósticos de la temperatura media por Estado 2008-2100 (Continuación)



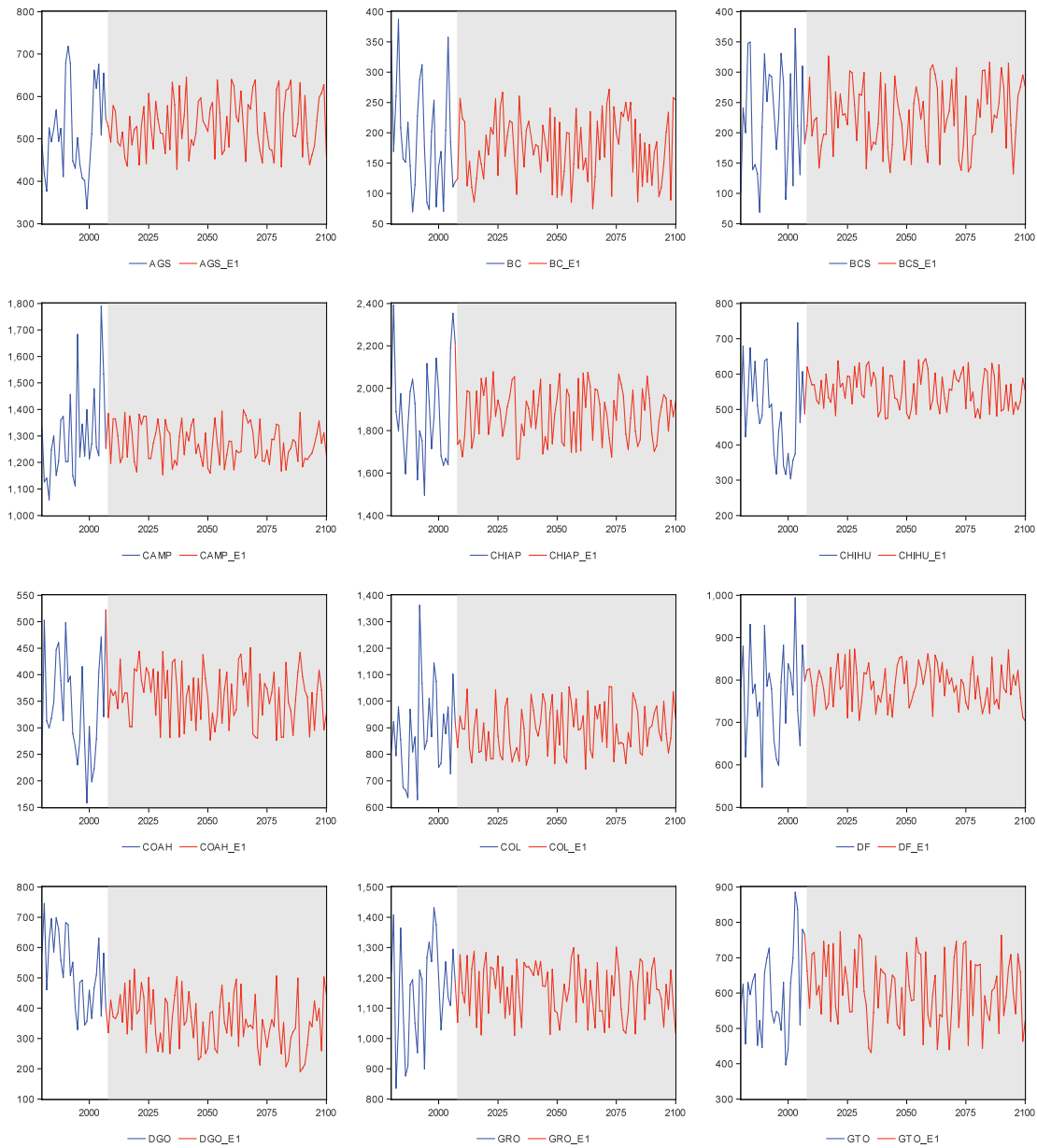
## Gráfica 12. Pronósticos de la temperatura media por Estado 2008-2100 (Continuación)



Gráfica 12. Pronósticos de la temperatura media por Estado 2008-2100 (final)

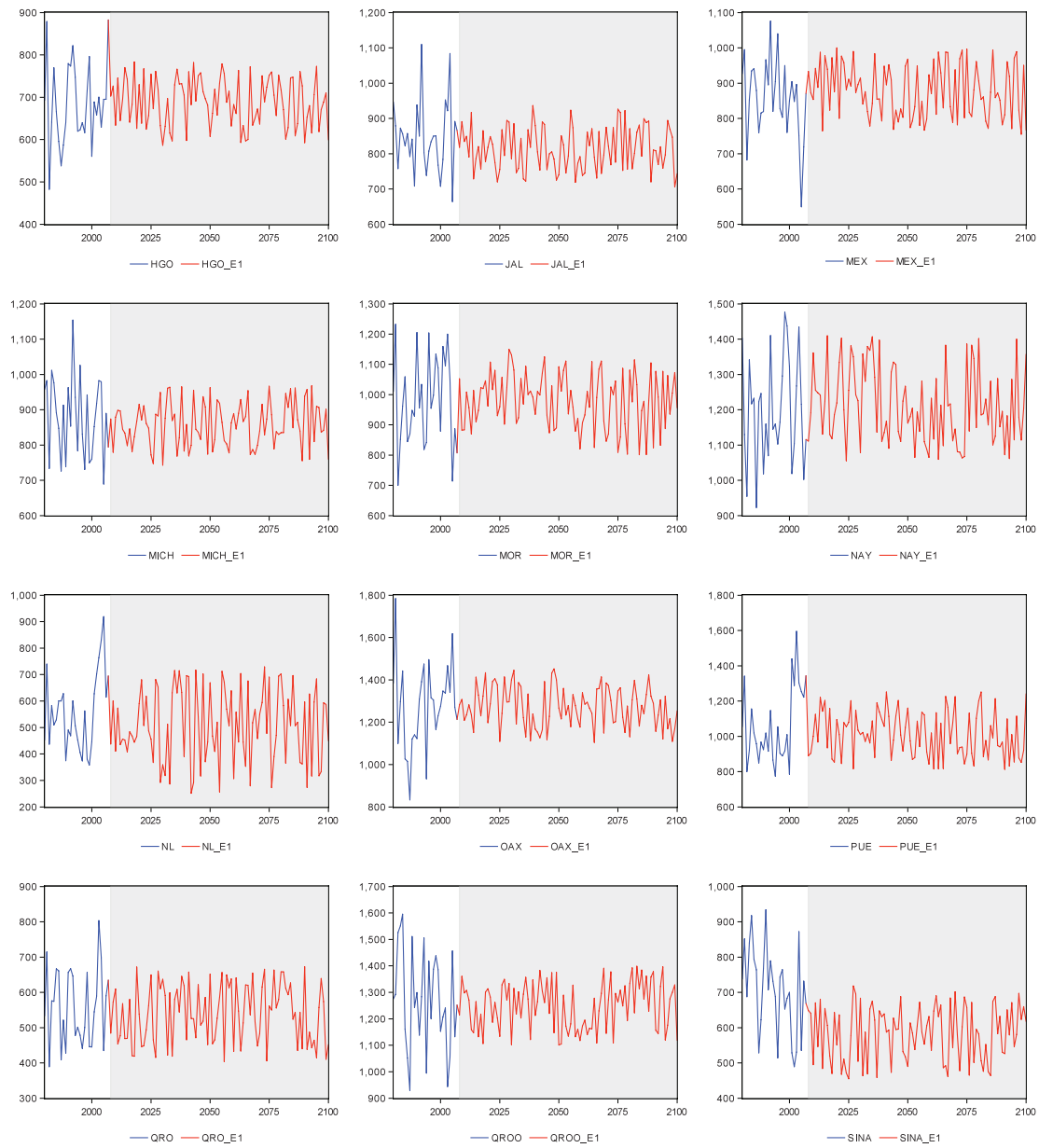


### Gráfica 13. Pronósticos de los niveles de precipitación promedio anual por Estado 2008-2100 (Milímetros)

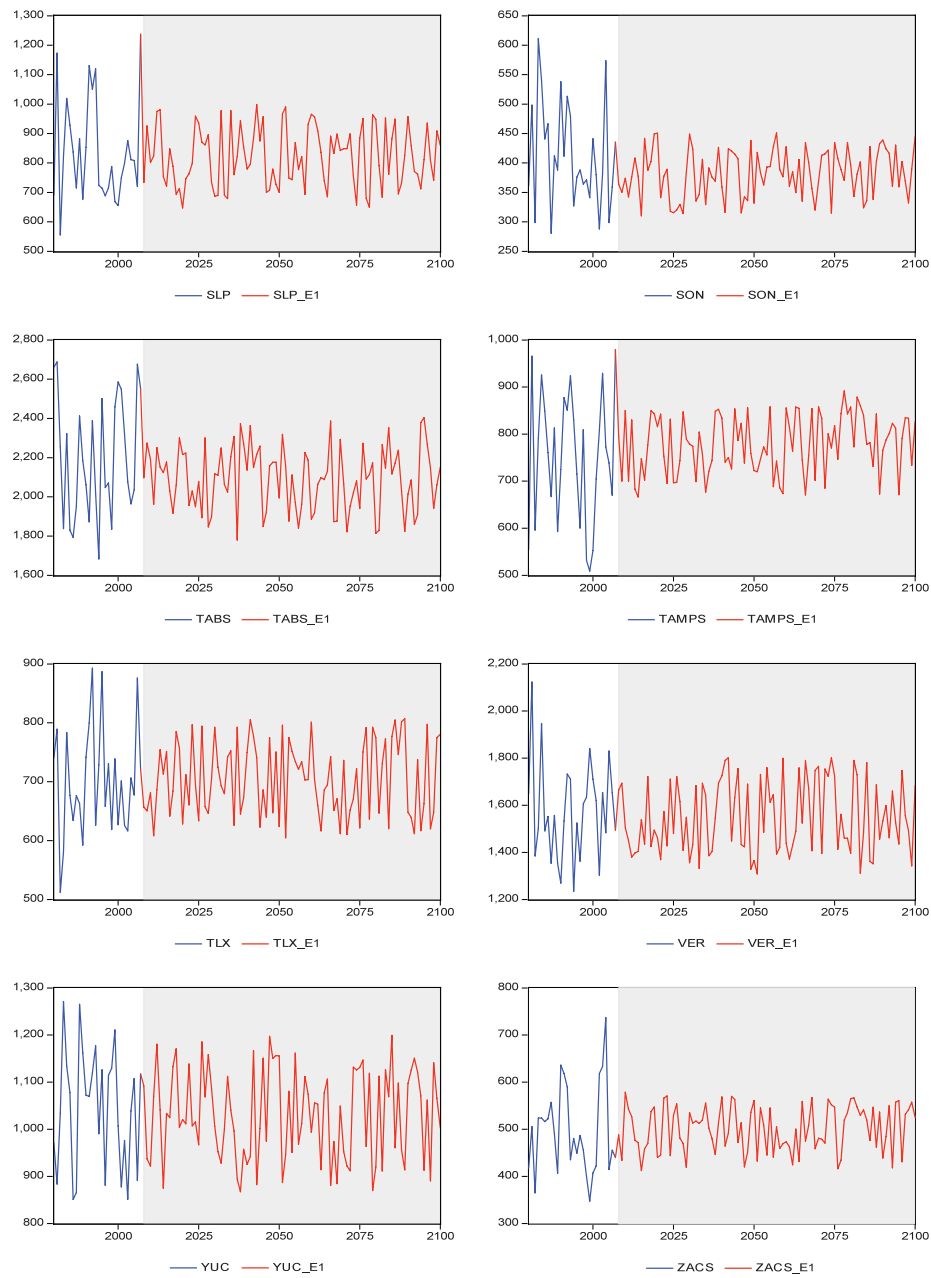




**Gráfica 13. Pronósticos de los niveles de precipitación promedio anual por Estado 2008-2100 (Milímetros) (Continuación)**



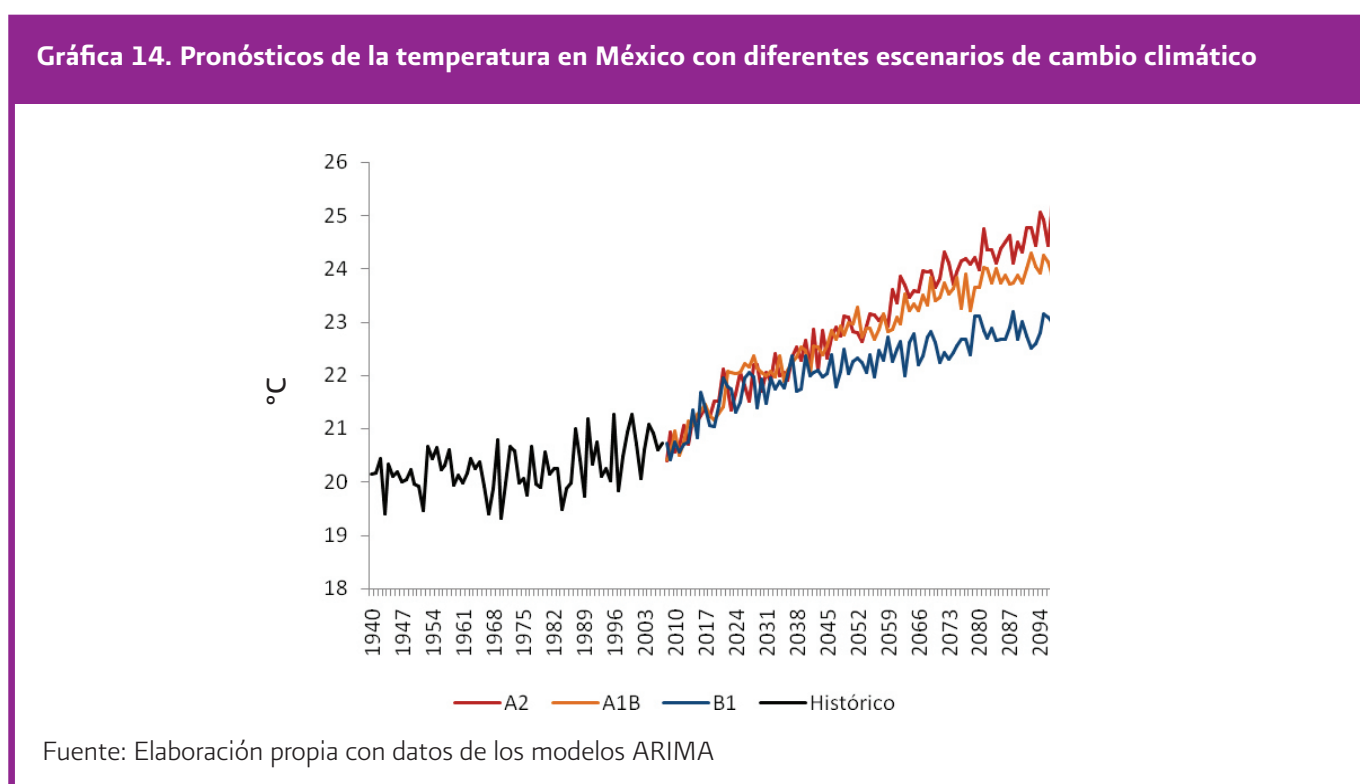
**Gráfica 13. Pronósticos de los niveles de precipitación promedio anual por Estado 2008-2100 (Milímetros) (Final)**



Con base en información del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM de diferentes estaciones meteorológicas y con base en los Modelos de Circulación General (MCGs) es factible obtener también una proyección de la temperatura media por estado para mediados o finales del presente siglo más precisa. En general, estos modelos muestran que en todas las entidades del país se espera un aumento en la temperatura media, que para mediados del presente siglo, podría ubicarse entre 1 y 3.0°C respecto a la temperatura media de las últimas dos décadas del siglo XX. Hacia finales de siglo, los aumentos de temperatura podrían alcanzar hasta los 4°C en algunas partes del norte de México con respecto del periodo base. En el caso de la precipitación por Estado la mayor parte de las proyecciones indican que las lluvias acumuladas anualmente disminuirán aunque se observan oscilaciones importantes. Los resultados de los distintos GCM simulados para México indican que:

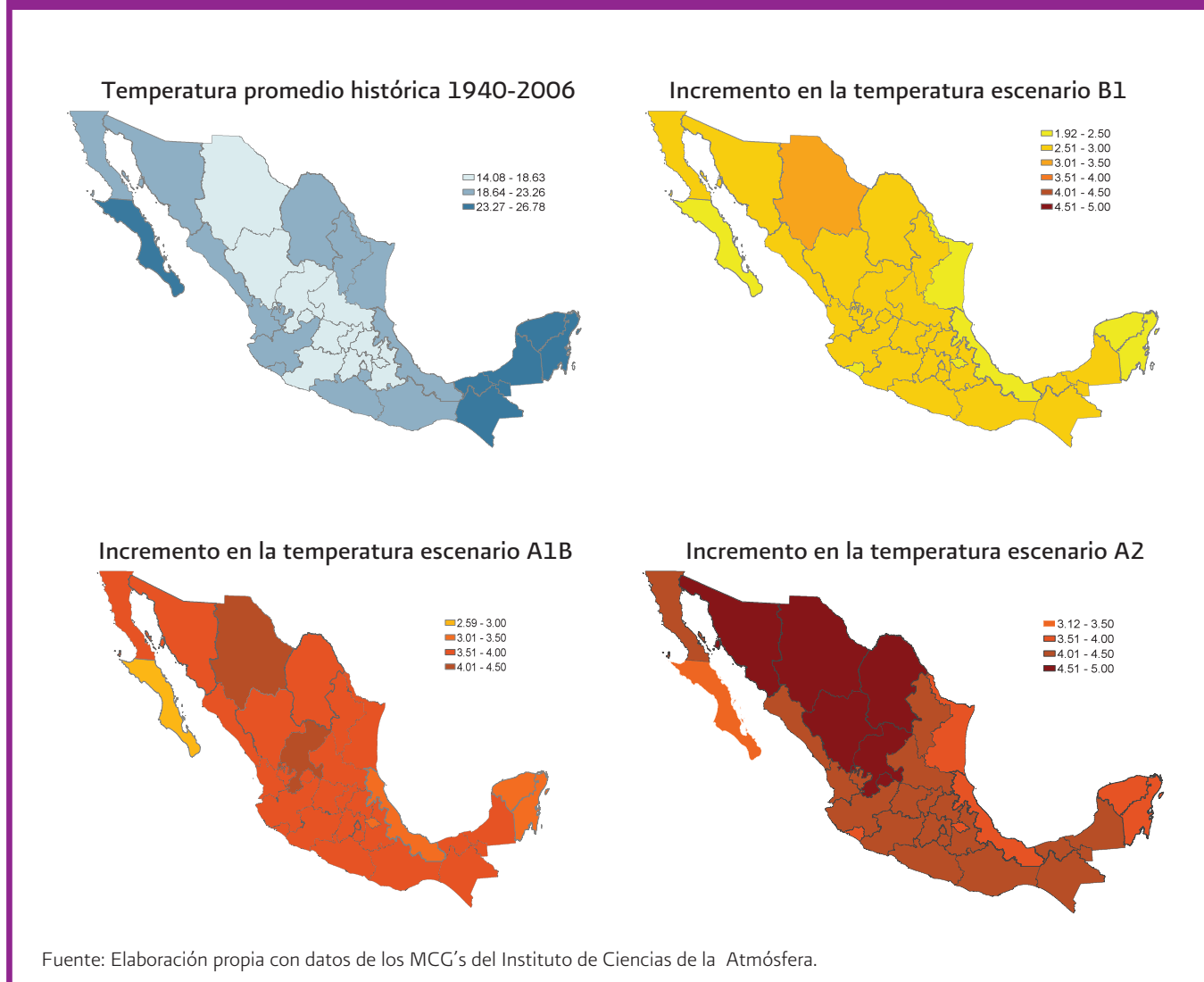
### EN TEMPERATURA:

- Existe un aumento de la temperatura media significativo que incluso se intensificará durante este siglo. Así, se espera un aumento de entre 1.5 y 4°C para este siglo dependiendo del escenario considerado (Gráfica 14).



- En el escenario A2 para finales de siglo, el cambio en temperatura media se proyecta entre 2.5 y 4.0°C, siendo el noroeste de México donde se esperan los mayores aumentos (Figura 6).
- En el escenario A1B se reporta un aumento promedio de entre 1.5 y 3.0°C.
- Prácticamente todas las realizaciones indican un cambio positivo en la temperatura media, siendo el mayor calentamiento en el norte y noroeste de México (Figura 6).

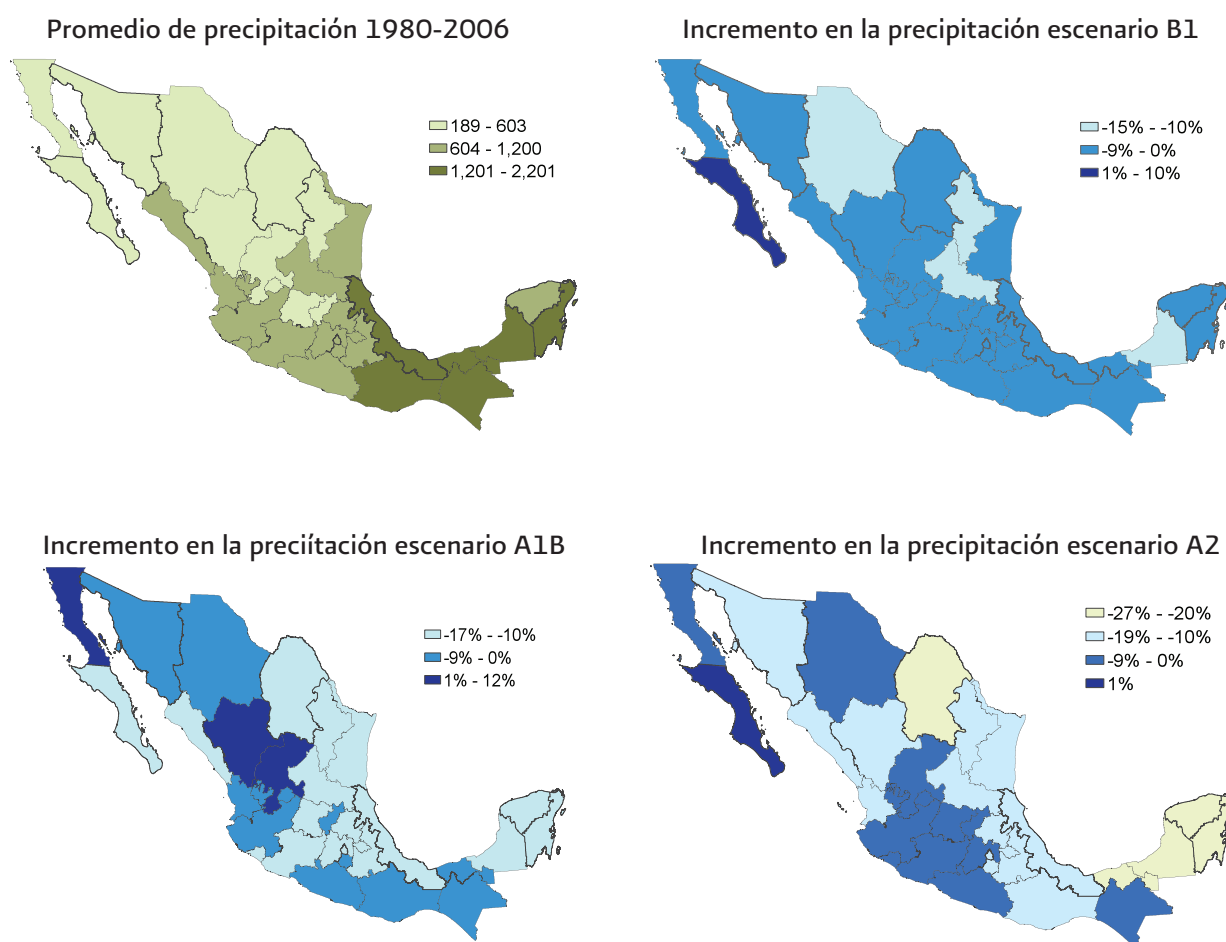
**Figura 6. Pronósticos del incremento en la temperatura al 2100 bajo diferentes escenarios de cambio climático.**



## PRECIPITACIÓN:

- Bajo el escenario A2 la precipitación promedio anual podría disminuir en promedio para todo el país en orden de 11% con un rango de variación espacial en el ensamble de entre -5.7 a -18%. (Figura 7).
- En el escenario A1B la reducción en precipitación podría ser de -9% con una variación de -15 a -3.5%. La dispersión entre escenarios de hasta 45% indica existe mayor incertidumbre en la dirección de cambio de la precipitación.
- Existe una gran dispersión en términos de la variación porcentual. Destaca que bajo el escenario A2, los estados del norte muestran una disminución porcentual importante.
- Con la baja resolución espacial de los MCGs, la señal del cambio en lo que respecta a la anomalía y dispersión presenta cambios significativos bajo los escenarios A2, A1B y B1 en casi todo México.

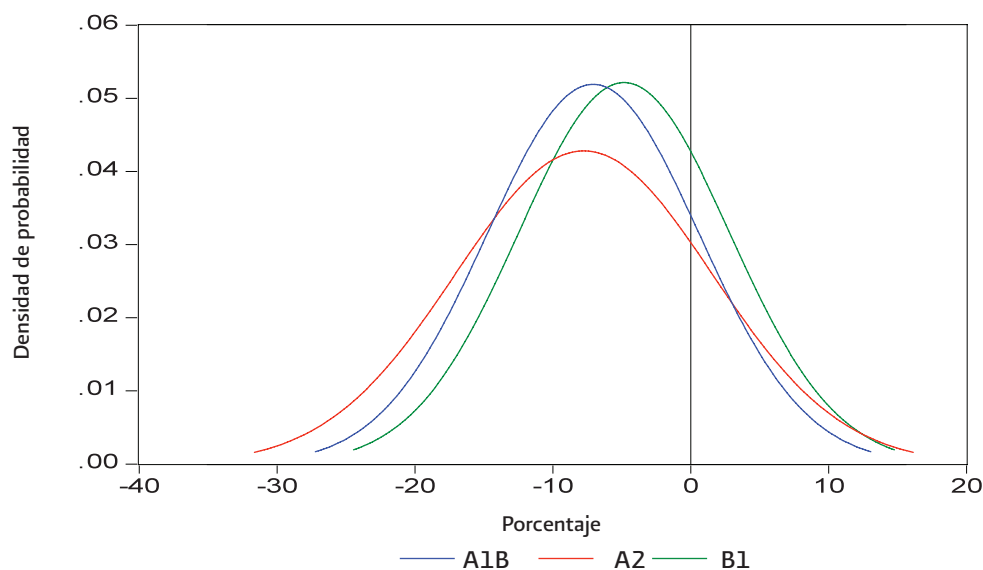
**Figura 7. Pronósticos de cambio porcentual en la precipitación al 2100 bajo diferentes escenarios de cambio climático**



Fuente: Elaboración propia con datos de los MCG's del Instituto de Ciencias de la Atmósfera.

Debe destacarse además que existe un cambio en la distribución de probabilidades del fenómeno climático de forma constante a la intensificación de los eventos extremos. Por ejemplo, la Gráfica 15 muestra la distribución de probabilidad de la anomalía de precipitación para finales del siglo XXI, para cada uno de los escenarios de emisiones. Los escenarios A1B y B1 muestran una distribución muy similar con una ligera disminución en la media del escenario A1B con respecto al escenario B1. Sin embargo, en el escenario A2, se aprecia un claro desplazamiento hacia valores negativos. La varianza de la distribución del escenario A2, es mayor a los otros dos escenarios y por tanto la probabilidad de eventos extremos es mayor. Así, pueden presentarse años en donde la precipitación a nivel nacional disminuya hasta en 30% en promedio nacional, implicando problemas de sequía, respecto al nivel de precipitación observado en las últimas tres décadas; sin embargo, también se pueden registrar aumentos superiores al 13% con riesgo de inundaciones. La variabilidad del fenómeno y el cambio en la distribución de probabilidades puede entonces modificar sustancialmente los impactos climáticos aunque ello es en extremo difícil de cuantificar aún.

**Gráfica 15. Distribución de la anomalía de precipitación bajo los diferentes escenarios de emisiones (datos a nivel nacional)**



Fuente: Elaboración propia con datos de los MCG's del Intituto de Ciencias de la Atmósfera.

Otras instituciones del país también han elaborado escenarios de temperatura y precipitación en el contexto del cambio climático. Por ejemplo, los escenarios del Instituto Nacional de Ecología (INE) muestran un aumento en la temperatura media de 1 a 2.5°C hacia el 2050 respecto al promedio observado en las dos últimas décadas y hacia el 2080 también registra un incremento en todas las entidades de entre 3 y 4°C. En el caso del nivel de precipitación hacia el 2080 se espera una disminución en los niveles de precipitación media anual por Estado, con reducciones de entre 5 y 20% en la mayoría de las entidades.

El conjunto de estas proyecciones son consistentes con las proyecciones a nivel global aunque aun es necesario identificar con mayor precisión las correlaciones entre mayor temperatura y menos lluvia (Madden y Willimas, 1978 y Trenberth y Shea, 2005).

## 4. CONCLUSIONES

1. Los modelos de series de tiempo permiten capturar la tendencia de la temperatura y precipitación en México. El aumento en la temperatura observado coincide con las proyecciones de cambio climático realizadas en los primeros informes del IPCC e indican que en el país y en todas las entidades de México se espera un aumento en la temperatura media aunque con diferencias regionales significativas.
2. Los modelos de clima permiten incorporar una gran diversidad de factores y por lo tanto representan una mejor aproximación de los escenarios futuros de las condiciones del clima. Los resultados muestran un fuerte aumento en la temperatura, por ejemplo, bajo el escenario A2, donde el incremento mayor en México es de aproximadamente 4°C.
3. El escenario B1 muestra un menor impacto en la temperatura, pero aun así las simulaciones de los modelos indican que se podría aumentar la temperatura hasta en 2°C. En un rango intermedio se ubica el escenario A1B con un aumento de 3°C, hacia el final del presente siglo.
4. Los escenarios en términos de precipitación indican una disminución generalizada de los niveles de precipitación aunque con un rango de incertidumbre importante. Así, bajo el escenario A2, la precipitación promedio anual podría disminuir en promedio para todo el país en orden de 11% con un rango de variación de -5.7 a -17.8%. Lo anterior no elimina la probabilidad de periodos de inundaciones.

## PARTE 2: ESCENARIOS MACROECONÓMICOS

### 2.1. LA METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS ECONÓMICO DEL CAMBIO CLIMÁTICO

#### Puntos fundamentales

La metodología de análisis de la economía del cambio climático se realizó en este estudio dividiendo analíticamente entre los impactos que originan el cambio climático en México y la contribución mexicana al cambio climático. Esta división es en alguna medida artificial ya que ambos aspectos están interconectados pero permite identificar, por un lado, los principales canales de vulnerabilidad y adaptación, y por el otro lado, a los procesos de mitigación. En principio, el estudio utiliza diversas herramientas de análisis tales como modelos econométricos o modelos de equilibrio general computable y se basa en contrastar escenarios inerciales o de *Business as usual* (BAU) sin cambio climático con aquellos que incorporan los efectos del cambio climático.

La construcción, simulación y proyección de escenarios económicos, sectoriales y demográficos vinculados con escenarios energéticos, regionales y ambientales es ciertamente una tarea compleja con un alto grado de incertidumbre. Para ello se requiere, en principio, identificar los patrones regulares existentes entre las variables económicas más relevantes y la evolución demográfica del país. Así, en este capítulo se presentan una visión macroeconómica, sectorial y demográfica que se utiliza como base para las proyecciones de los escenarios económicos del proyecto “La Economía del Cambio Climático en México”. Los principales patrones regulares identificados son los siguientes:

- Durante las décadas de los sesenta y setenta la trayectoria del Producto Interno Bruto (PIB) registró un crecimiento sostenido. El año de 1982 representa un punto de inflexión en la trayectoria tendencial del conjunto de la economía hacia un menor ritmo de crecimiento a largo plazo. Asimismo, junto con el descenso en la tasa de crecimiento también se ha presentado una mayor volatilidad de la serie.
- La dinámica de crecimiento de la economía mexicana ha registrado con mayor frecuencia (50% de los casos) tasas en el rango de 2 a 5%. En un segundo término se ubican las tasas mayores a 5% sobre todo en el periodo de 1960 a 1981 (30% de los casos), y con una menor probabilidad, se ubican las tasas menores a 2%, asociadas sobre todo a la década de los ochenta y la crisis de 1995. De esta forma atendiendo a la distribución de frecuencias de las tasas de crecimiento se puede considerar que con un 50% de probabilidad el crecimiento de la economía mexicana se ubicará en un rango de entre 2 a 5% anual.
- Todos los sectores de la economía redujeron su tasa de crecimiento potencial durante la década de los ochenta respecto a la evolución que habían presentado en la década de los sesenta y setenta. De este modo se transitó de tasas superiores al 5% anual, en la década de los sesenta y setenta, a tasas de 2.5% a mediados de los ochenta y actualmente, tienden a estabilizarse en aumentos de alrededor del 3 al 3.5%, aunque en los últimos seis años se observa una mayor divergencia en el crecimiento sectorial.
- El crecimiento potencial del sector servicios se ubica en 4%, el sector agropecuario en 2.1% y el sector industrial, que desde mediados de los noventa muestra una tendencia descendente, reporta una tasa potencial de crecimiento de 2.5%. Ello desde luego modificaría la composición sectorial.
- En los componentes de demanda agregada, el consumo privado se ha consolidado como la variable más dinámica y de mayor contribución a la demanda agregada, la inversión pública muestra una clara tendencia descendente en tanto que la inversión privada muestra fuertes fluctuaciones aunque se ha mantenido alrededor del 18% del PIB. Ello se asocia a la disminución en la tasa de crecimiento potencial de la economía.
- Con una probabilidad del 60% se espera que el ritmo de crecimiento de la economía nacional, durante el periodo de 2008 a 2100, se ubique en un rango de 2.9 a 4.3% anual con un crecimiento promedio de 3.5%. Existe un 20% de probabilidad de que este crecimiento se ubique entre 1 y 2.6% anual.
- En el caso del sector agropecuario el escenario más probable ubica su crecimiento promedio anual de 1.6 a 2.8% anual. Solo existe un 10% de probabilidad de que el sector acelere su crecimiento a un rango de 2.9 a 4.8%. El sector industrial mantendrá un ritmo ligeramente inferior al promedio de la economía nacional, fluctuando en un rango de 2.1 a 3.4% anual. Los servicios seguirán siendo el sector dinámico de la economía y su crecimiento será superior a los otros dos sectores con un ritmo del orden de 2.4 a 5.1% anual. En el caso en que la economía muestre un mejor desempeño entonces, este sector podría crecer entre 5.5% y hasta 7.4%, en promedio anual entre 2008 y 2100.
- Los escenarios demográficos indican que la población crecerá a tasas cada vez menos aceleradas para alcanzar su punto máximo a mediados de la década del 2040, con una población alrededor de los 130 millones de habitantes. A partir de la década del 2050 se pronostica una tasa de crecimiento promedio anual de la población negativa de 0.34%, estabilizándose en un nivel alrededor de los 102 millones de habitantes en el año 2100, similar al valor reportado en el año 2004.

## 1. INTRODUCCIÓN

La evolución de las principales variables macroeconómicas de una economía es el resultado de una compleja matriz de interrelaciones que incluye tanto patrones regulares como diversos *shocks* y relaciones no lineales o con rezagos y cambios estructurales. No obstante ello, es posible identificar y descomponer los factores fundamentales que inciden en la evolución de las principales variables macroeconómicas y establecer sus formas de relación. Esta evolución del conjunto de las variables macroeconómicas tiene una estrecha relación con el medio ambiente y permite identificar la trayectoria de las principales fuentes de emisiones de GEI y por tanto simular y construir diversos escenarios que relacionan la evolución macroeconómica con las emisiones de GEI. De este modo, es posible evaluar estrategias económicas alternativas y sus impactos en las emisiones de GEI. Desde luego, la realización de estas proyecciones y simulaciones tiene un nivel de incertidumbre importante que es necesario considerar, en particular atendiendo a las condiciones actuales.

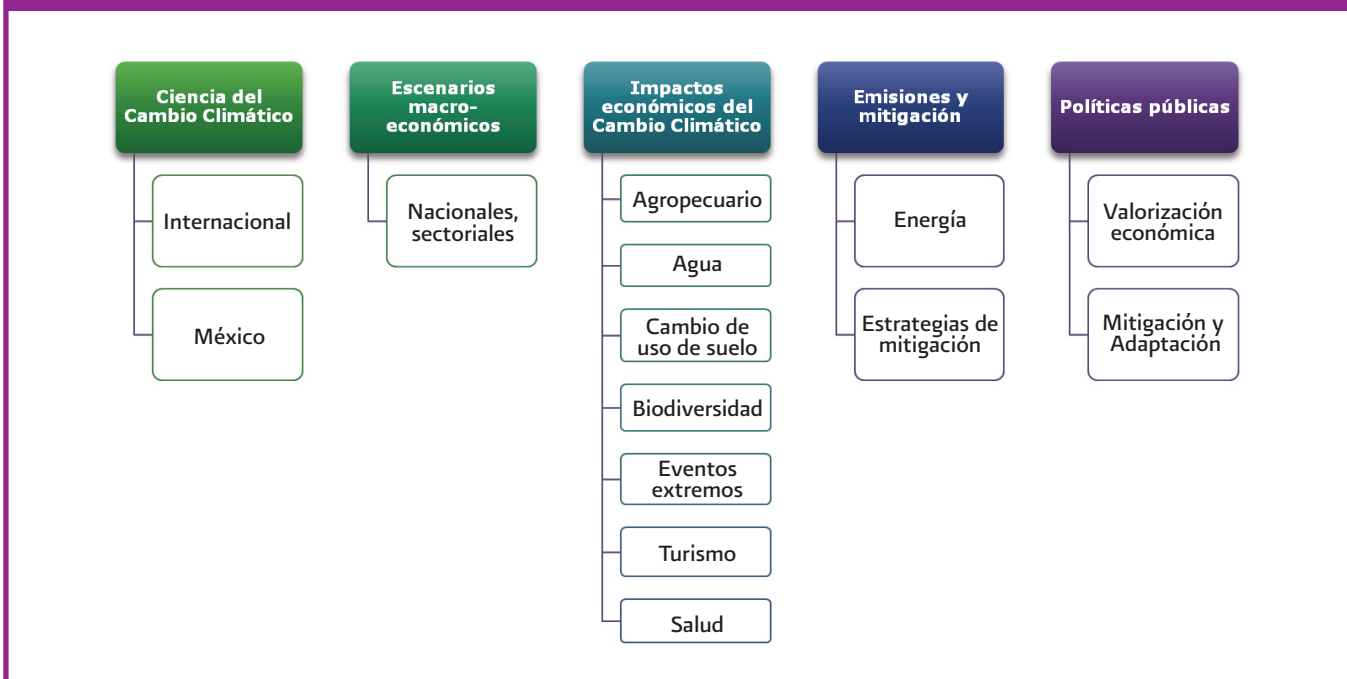
## 2. LA METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS ECONÓMICO DEL CAMBIO CLIMÁTICO

El análisis económico del cambio climático es ciertamente una tarea en extremo compleja. Su análisis puede realizarse utilizando diversas herramientas de los análisis económicos aplicados tales como el análisis de costo-beneficio, los modelos de equilibrio general computable, los modelos econométricos o los modelos integrados de análisis. La selección del tipo de análisis depende de propósito del análisis, del tipo de información disponible e incluso del tiempo disponible. En todo caso, puede argumentarse que estos análisis son en muchos sentidos complementarios. En este estudio se combinaron diversos métodos de análisis que incluyen tanto estimaciones econométricas como modelos de equilibrio general computable y análisis costo-beneficio. Ello permite dar solidez a los resultados en la medida en que las tendencias generales se observan en los diversos modelos.

El análisis se divide en tres grandes componentes (Figura 8). En primer lugar se identifica y analiza los principales impactos del cambio climático en México incluyendo a los sectores agropecuarios, recursos hídricos, cambio de uso de suelo, eventos extremos y salud. Este análisis se basa en la construcción de escenarios inerciales o de *Business as usual* (BAU) sin cambio climático que posteriormente son contrastados con los escenarios que incluyen el impacto del cambio climático. Esta separación puede ser arbitraria pero es necesaria para identificar los impactos. Posteriormente, se analiza, en un segundo gran apartado, la contribución mexicana al cambio climático en particular atendiendo a aquella asociada a la quema de combustibles fósiles. En el tercer gran apartado se evalúan los costos y beneficios del cambio climático atendiendo a la vulnerabilidad y la adaptación como al proceso de mitigación. Estos apartados se analizan de manera independiente aunque, desde luego, existen interconexiones significativas entre ellos. Esto es, la estrategia de mitigación internacional tiene consecuencias significativas sobre los impactos del cambio climático. No obstante ello, en este caso se considero que la contribución mexicana al cambio climático es de una magnitud que no modifica los impactos agregados.



Figura 8. La metodología del estudio del cambio climático



Desde luego, que los resultados obtenidos deben de tomarse con precaución. Esto es, es altamente probable que los procesos de mitigación y adaptación en curso modifiquen el resultado final, a ello contribuirá además los procesos de innovación tecnológica, los cambios en los precios relativos y las diferentes regulaciones a aplicarse. De este modo, el conjunto de escenarios descritos sólo pretende ilustrar la posible evolución de un proceso de muy largo plazo.

### 3. EVOLUCIÓN RECIENTE Y PERSPECTIVAS DE LA ECONOMÍA MEXICANA

#### 3.1. LA EVIDENCIA INTERNACIONAL

La economía mundial muestra una mayor interdependencia de las economías nacionales como resultado de un creciente flujo de personas, mercancías y saldos monetarios y financieros. Este proceso está apoyado en un intenso avance tecnológico que ha estimulado un aumento de la productividad, reducido costos de transporte e información y posibilitado la segmentación de los procesos de producción y distribución a nivel internacional. La creciente internacionalización de las economías nacionales se manifiesta en la mayor participación de las exportaciones y las importaciones en el producto por país, en un creciente flujo de inversión extranjera directa e incluso en una mayor migración de partes significativas de la población mundial.

La actividad económica a nivel mundial, en los últimos siete años, muestra una pérdida de dinamismo derivado del desempeño de los países desarrollados y de las economías de América Latina y el Caribe (Cuadro 6 y Gráficas 16 y 17), obviamente acentuado por la crisis financiera actual. Así, se observa que la tasa de crecimiento económico promedio para el conjunto de los países de América Latina<sup>6</sup> es de 3.07 % para el período 2000-2007 (CEPAL, 2008) que resulta menor que aquella de la década de los noventa. En este contexto, las principales tendencias de la economía mundial<sup>7</sup> indican que:

<sup>6</sup> Considerando un promedio simple sin ponderar por el tamaño de los PIB por países.

<sup>7</sup> Ello previo a la actual crisis financiera del 2008.

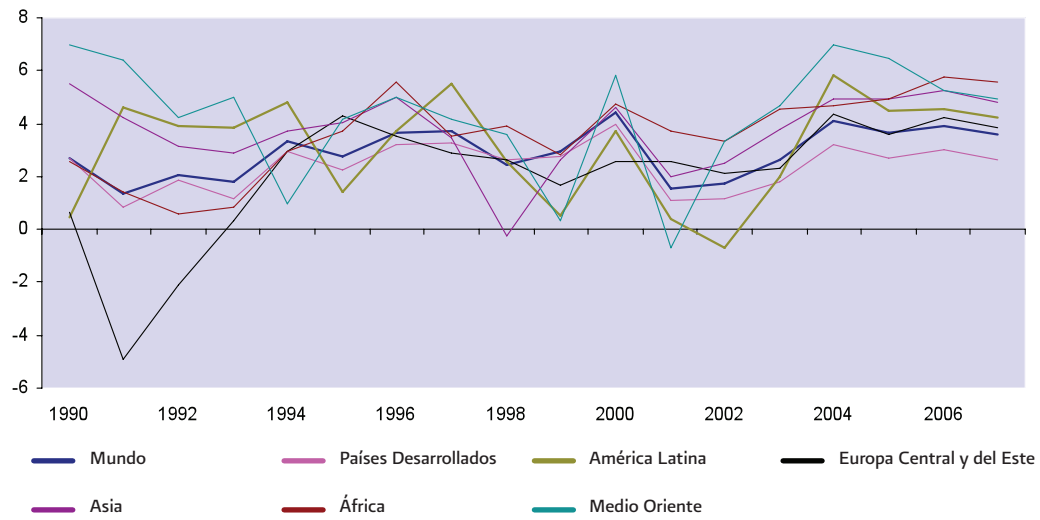
- Las economías nacionales muestran una mayor integración y dependencia a la economía mundial a través de un creciente flujo de capital, de mercancías y de personas. En este contexto, la mayor integración de las economías nacionales a la economía mundial conduce a que los canales de transmisión de los impulsos de la economía global sean cada vez más directos e intensos, aunque persisten diferencias importantes entre regiones y países.
- La evolución del producto mundial muestra una tendencia ascendente aunque con diferente intensidad en distintas partes del mundo (Gráficas 16 y 17).
- En Asia se observa que, desde mediados de la década de los setenta, se inició una fase de expansión que le ha permitido mantener un ritmo de crecimiento acelerado.
- Las economías desarrolladas muestran un desempeño económico más modesto, desde principios de la década de los noventa.
- Los países de Europa Central y del Este, han iniciado una fase de recuperación en su dinámica de crecimiento. Una situación similar se aprecia en las regiones de África y Medio Oriente.
- En el caso de América Latina y el Caribe durante la década de los noventa inicia una etapa de recuperación. Sin embargo, el ritmo de crecimiento no ha sido sostenido y claramente es la región con un menor crecimiento, con excepción del conjunto de las economías desarrolladas.
- Este resultado, sugiere que el proceso de internacionalización de las economías, impulsado por el creciente flujo comercial y financiero, no ha conducido a un proceso de convergencia, en términos de crecimiento económico y niveles de vida, entre las regiones del mundo.
- El análisis de las trayectorias y el ciclo del crecimiento económico, a nivel mundial, muestran que las distintas regiones del mundo tienden a seguir la evolución de la economía mundial pero persisten importantes desigualdades en términos de capacidades de crecimiento. Diversos factores pueden explicar esta situación, como la fuerza de trabajo, el capital y la tecnología disponible, el incremento de la productividad, las condiciones laborales y los movimientos cíclicos de la demanda agregada.

## CUADRO 6. TASAS DE CRECIMIENTO DEL PIB POR REGIONES DEL MUNDO 1970-2007

Región	Promedio del período			
	1970-1980	1980-1990	1990-2000	2000-2007
Mundo	3.66	3.11	2.84	3.20
Países Desarrollados	3.34	3.05	2.48	2.46
América Latina y el Caribe	5.59	1.22	3.45	3.07
Europa Central y del Este	3.68	2.33	1.28	2.18
Asia	5.22	6.37	6.44	4.10
África	4.04	2.51	3.00	4.67
Medio Oriente	5.09	2.19	3.95	4.60

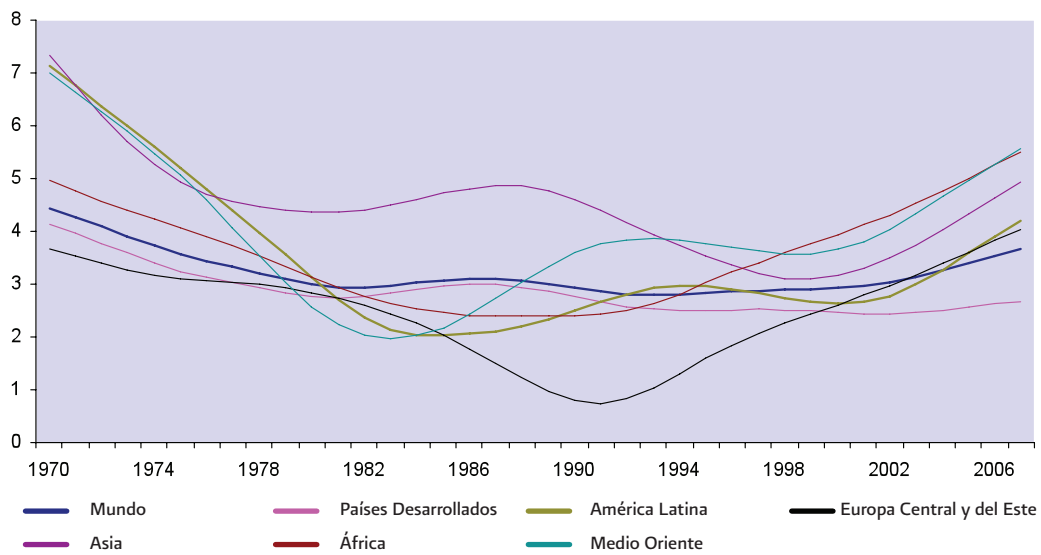
Fuente: Elaboración propia en base a datos publicados por el Banco Mundial.

**Gráfica 16. Tasa de crecimiento del PIB mundial y por regiones, 1990-2007**



Fuente: Elaboración propia en base a datos publicados por el Banco Mundial.

**Gráfica 17. Filtro Hodrick-Prescott de la tasa de crecimiento del PIB mundial y por regiones. 1970-2007**



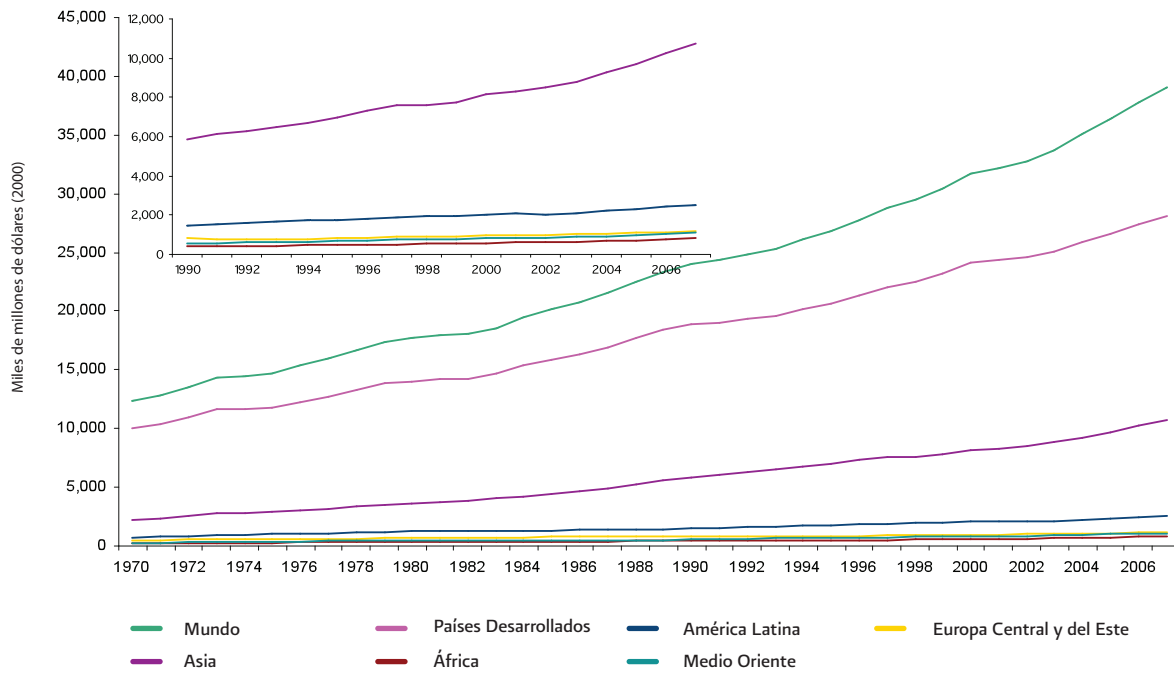
Fuente: Elaboración propia en base a datos publicados por el Banco Mundial.

Estos ritmos de crecimiento diferenciados se manifiestan en una evolución del producto que no muestra una clara tendencia a la convergencia en el ingreso de las diversas regiones del mundo (Gráfica 18).

### Globalización económica y convergencia económica

El proceso de globalización se ha traducido en una mayor dependencia de las economías nacionales de los flujos internacionales de capitales y mercancías y por tanto de los efectos y transmisiones de los impulsos del crecimiento económico o de las crisis financieras. En este contexto, los modelos de crecimiento endógeno sugieren la existencia de diversas formas de convergencia económica (Galor, 1996). Así, una primera forma de convergencia conocida como absoluta es el caso donde el crecimiento de los países pobres es más rápido que el de los países ricos que sin embargo la evidencia empírica reciente tiende a rechazar, en forma absoluta (Sala-i-Martin, 1996). Ello ha llevado a desarrollar el concepto de convergencia condicional donde se considera que la convergencia en los niveles de ingreso puede aproximarse por dos distribuciones normales que corresponden a clubes de convergencia entre países<sup>8</sup> (Quah, 1996) y que se traduce en una tasa de alrededor de 2% anual (Sala-i-Martin, 1996). En este proceso deben destacarse también los impactos de la economía internacional en particular de los Estados Unidos de Norteamérica sobre el comportamiento de economías fuertemente ligadas a ella a través de diversos canales de transmisión como son las exportaciones, la inversión extranjera directa o los flujos de capitales internacionales.

Gráfica 18. Evolución del producto de la economía mundial y por regiones, 1970-2007



Fuente: Elaboración propia en base a datos publicados por el Banco Mundial.

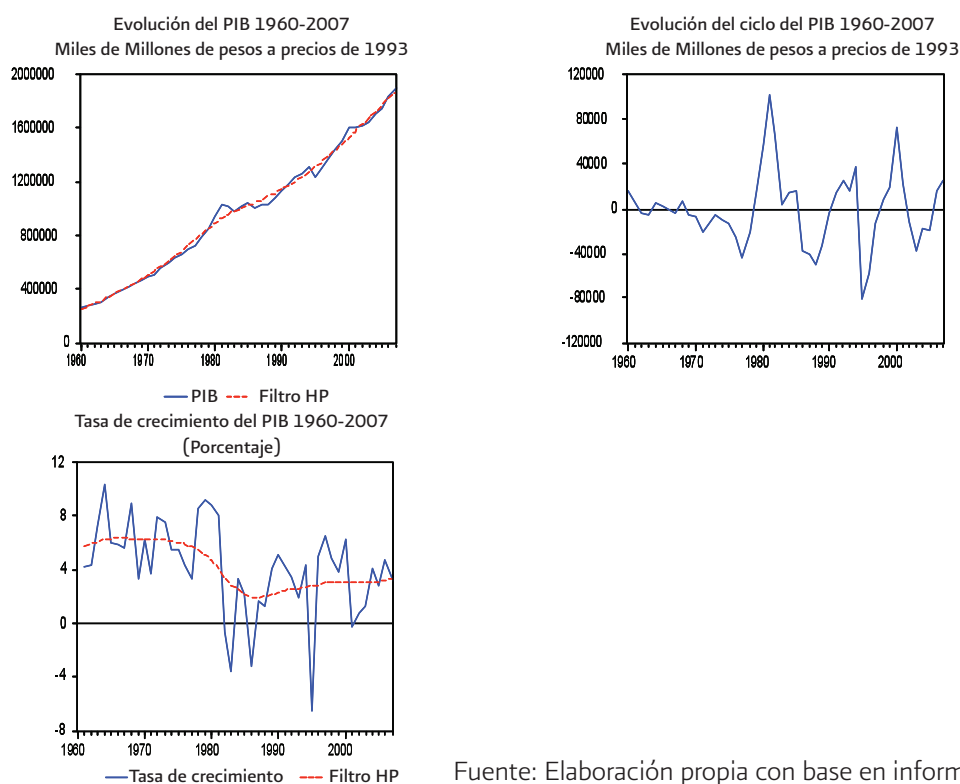
<sup>8</sup> O al menos argumentar que existe una distribución bimodal pero con cotas (Ross, 2000)

### 3.2. EL CRECIMIENTO ECONÓMICO EN MÉXICO

Los factores que explican los ritmos de crecimiento de las economías son ciertamente múltiples<sup>9</sup> e incluyen elementos económicos, monetarios y financieros, sociales, demográficos, productividades factoriales<sup>10</sup>, estructuras productivas, régimen cambiario, reformas estructurales como la liberalización comercial, variables institucionales, así como la disponibilidad de recursos naturales (De Gregorio y Lee, 2003; Ros, 2000; Mankiw, Romer y Weil, 1992; King y Levine, 1993, Gallup y Sachs, 1998 y Nordhaus, 2006). En este contexto, se observa que la trayectoria del PIB en México muestra un proceso de crecimiento económico que sigue un patrón de fluctuaciones alrededor de una tendencia ascendente (Hodrick y Prescott, 1997 y Blanchard, 1997). Esta trayectoria tendencial del PIB, puede asociarse a un crecimiento potencial o un crecimiento compatible con la dotación de factores productivos y el nivel de tecnología disponible. Así, las desviaciones de esta trayectoria muestran los ciclos de expansión y recesión en torno a la tendencia general de las últimas cuatro décadas. De esta forma los principales patrones regulares observados son:

- Durante las décadas de los sesenta y setenta la trayectoria del PIB registró un crecimiento sostenido acorde su trayectoria de largo plazo.
- En 1982 representa un punto de inflexión en el crecimiento tendencial de largo plazo del conjunto de la economía, que se identifica como un cambio en la pendiente de la tendencia, hacia un menor ritmo de crecimiento a largo plazo (Gráfica 19).

Gráfica 19. Evolución del PIB nacional



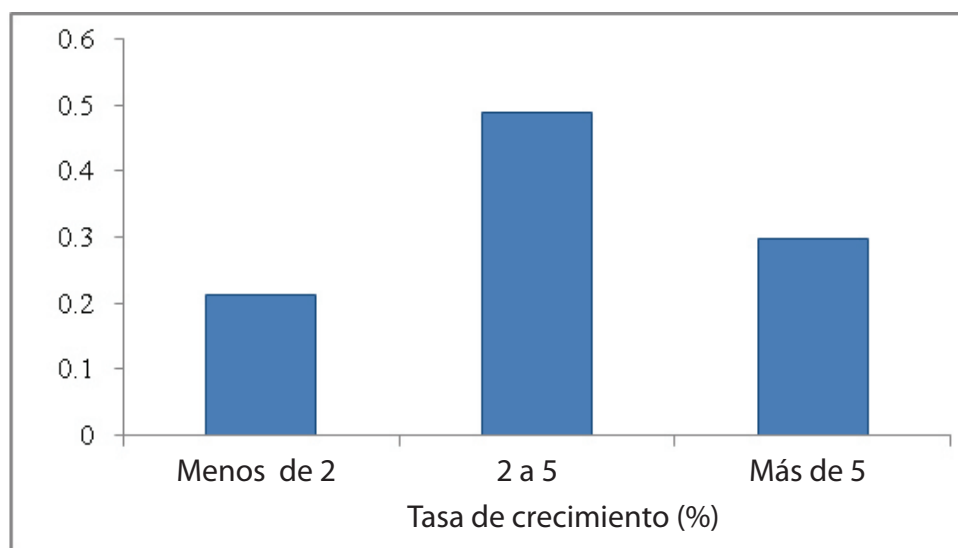
Fuente: Elaboración propia con base en información de INEGI.

<sup>9</sup> Existen procesos de retroalimentación importantes tales como que la tasa de fertilidad disminuye con el aumento del ingreso per cápita o la educación que es necesario considerar.

<sup>10</sup> Las diferencias en las productividades de los factores implica además que podría tenerse un servicio más eficiente en el uso de los recursos y de los insumos lo que podría contribuir a un desarrollo sustentable.

- La dinámica de crecimiento de la economía mexicana, en una distribución de frecuencias trimodal (Renshaw, 1991), indica que ha registrado con mayor frecuencia (50% de los casos) tasas en el rango de 2 a 5% anual. En un segundo término se ubican las tasas mayores a 5% sobre todo en el periodo de 1960 a 1981 (30% de los casos), y con una menor probabilidad se ubican las tasas menores a 2% (Gráfica 20).

**Gráfica 20. Tasa de crecimiento del PIB. Distribución tri modal de la tasa de crecimiento del PIB media anual (%), 1960 - 2007**



Fuente: Elaboración propia con base en información de INEGI.

### 3.3. ANÁLISIS SECTORIAL

Un análisis similar se puede realizar considerando los sectores productivos de la economía mexicana para identificar la evolución de la estructura productiva y los posibles escenarios de crecimiento por sectores. Así, las trayectorias de largo plazos sectoriales indican que (Cuadro 7):

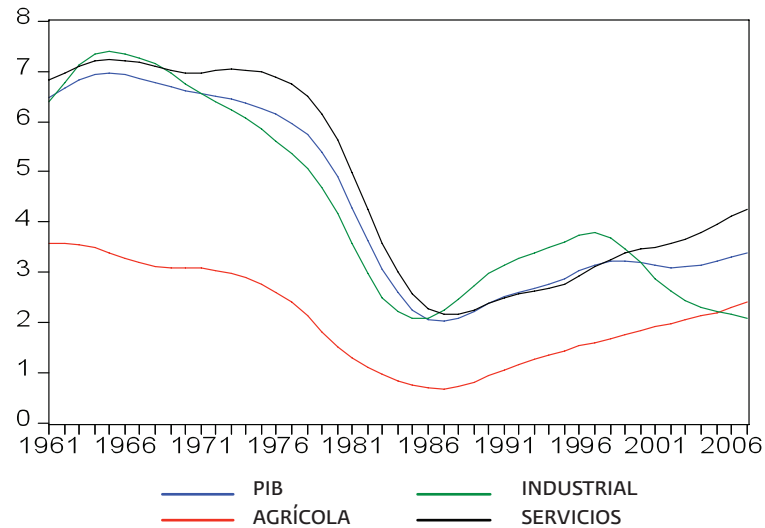
#### CUADRO 7. VALORES DE EQUILIBRIO DE LARGO PLAZO DE LA ECONOMÍA MEXICANA, 1987-2007

Año	PIB Total	PIB Agropecuario	PIB Industrial	PIB Servicios
1990	2.38	0.96	2.97	2.38
2000	3.20	1.84	3.19	3.45
2007	3.39	2.40	2.08	4.27
<b>Promedio 1987-1999</b>	2.68	1.24	3.23	2.67
<b>Promedio 2000-2007</b>	3.20	2.10	2.49	3.79

Fuente: Elaboración propia con base en información de INEGI.

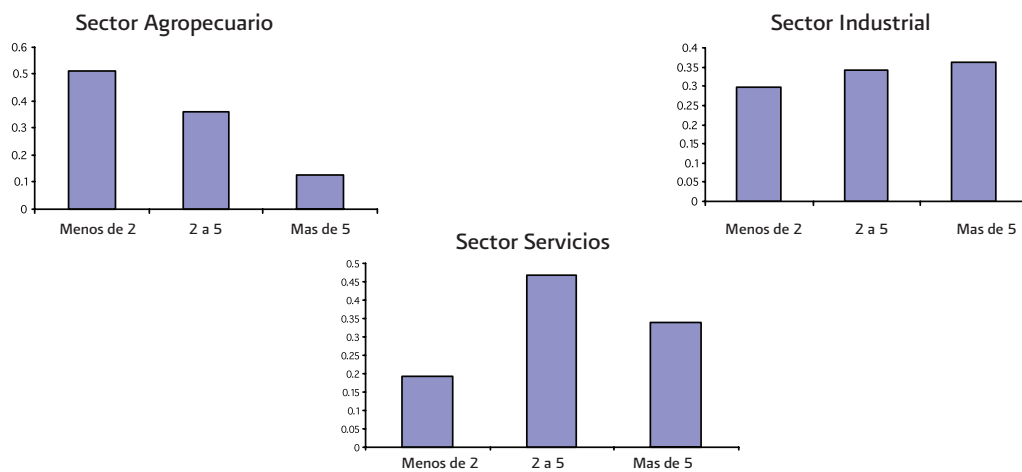
Todos los sectores de la economía redujeron su tasa de crecimiento potencial durante la década de los ochenta respecto a la evolución que habían presentado en los sesenta y setenta (Gráfica 21). Incluso pasando de niveles cercanos al 6.5% anual en la década de los sesenta y setenta a niveles de 2.5% a mediados de los ochenta. Actualmente, tienden a estabilizarse en una tasa un poco mayor aunque se observa también que en los últimos años se presenta una mayor divergencia en el crecimiento sectorial con un mayor dinamismo del sector servicios (Gráfica 22).

**Gráfica 21. Filtro Hodrick-Prescott de la tasa de crecimiento del PIB por sectores económicos, 1960-2007**



Fuente: Elaboración propia con base en información de INEGI.

**Gráfica 22. Distribución tri modal de la tasa de crecimiento anual de los sectores productivos de la economía, 1970-2007**



Fuente: Elaboración propia con base en información de INEGI.

- La evolución del sector servicios muestra una fuerte correlación con el ciclo del conjunto de toda la economía y mantiene la misma evolución a lo largo del tiempo, reportando tasas de crecimiento potencial bastante similares. Sin embargo, en los últimos siete años el sector servicios ha logrado un mayor dinamismo ubicando su crecimiento potencial en casi 4%, que resulta superior al promedio de la economía.
- El sector agropecuario, reporta tasas de crecimiento potenciales por abajo del resto de los sectores aunque desde finales de los noventa inicia una fase de recuperación importante, posiblemente explicada por el aumento de las exportaciones y de los precios de ciertos productos agropecuarios destinados al mercado de los Estados Unidos de Norteamérica. No obstante mantiene una brecha de 2 puntos porcentuales con el sector servicios.
- Por su parte, el sector industrial entre 1965 a 1985 muestra tasas de crecimiento de equilibrio bastante similares al conjunto de la economía; aunque a partir de 1986 se aprecia un crecimiento sostenido por arriba del resto de los sectores que, sin embargo, desde finales de los noventa se ha caracterizado por una clara tendencia descendente en su crecimiento potencial.

### 3.4. MODELOS ECONÓMÉTICOS PARA LA ESTIMACIÓN DE LOS ESCENARIOS ECONÓMICOS

El conjunto de información, sobre el crecimiento potencial y proporciones de los componentes de la demanda agregada, se incorporó en un modelo econométrico simple de pequeña escala basado en una especificación que permite identificar y analizar los impactos fundamentales del cambio climático. El modelo<sup>11</sup> está integrado por tres bloques:

- El modelo agregado del PIB que se especifica como una función del capital ( $K_t$ ) el nivel de empleo ( $E_t$ ), los precios relativos de la energía ( $PRE_t$ ) y el tipo de cambio real ( $TCR_t$ ). Ello permite obtener una trayectoria de largo plazo del ritmo de crecimiento de la economía.
- El segundo bloque se integra por los componentes de la demanda agregada, siguiendo una especificación tradicional para cada una de las variables (consumo, inversión, gasto de gobierno, exportaciones e importaciones). Este bloque permite hacer consistente la trayectoria del PIB, derivada del primer modelo.
- El tercer bloque se integra por los modelos sectoriales (agropecuario, industrial y de servicios).

El bloque del PIB agregado y sectoriales se resuelve de manera simultánea. Ello permite obtener resultados consistentes entre la trayectoria agregada y por sectores. En el caso de la demanda agregada, el bloque funciona como modelo satélite que se resuelve de manera simultánea y sirve como punto de comparación respecto a los otros dos bloques. Este modelo permite obtener pronósticos de la evolución de la economía bajo ciertos supuestos sobre la trayectoria de las variables exógenas. En este sentido, se decidió elaborar un cuarto bloque de modelos, especificados como modelos de series de tiempo que validan los pronósticos de los primeros tres bloques.

<sup>11</sup> El modelo está en los apéndices.



## Modelo de Crecimiento Económico

Modelo PIB

$$\Delta Y_t = \beta_0 + \beta_2 \Delta Y_{t-1} + \delta [Y_{t-1} - \alpha_1 I_{t-1} - \alpha_2 WF_{t-1} - \alpha_3 R_{t-1} - \alpha_4 PRE_{t-1} - \alpha_4 SR_{t-1}] + u_t$$

Consumo

$$\Delta C_t = \beta_0 + \beta_1 \Delta C_{t-1} + \delta [C_{t-1} - \alpha_1 Y_{t-1} - \alpha_2 W_{t-1}] + u_t$$

Demanda Agregada

Inversión

$$\Delta I_t = \beta_0 + \beta_1 \Delta I_{t-1} + \delta [I_{t-1} - \alpha_1 Y_{t-1} - \alpha_2 R_{t-1}] + u_t$$

Exportación

$$\Delta X_t = \beta_0 + \beta_1 \Delta X_{t-1} + \delta [X_{t-1} - \alpha_0 - \alpha_1 Y_{t-1}^{us} - \alpha_2 TCR_{t-1}] + u_t$$

Importación

$$\Delta M_t = \beta_0 + \beta_1 \Delta M_{t-1} + \delta [M_{t-1} - \alpha_0 - \alpha_1 Y_{t-1} - \alpha_2 TCR_{t-1}] + u_t$$

Gobierno

$$\Delta G_t = \beta_0 + \beta_1 \Delta G_{t-1} + \delta [C_{t-1} - \alpha_1 Y_{t-1}] + u_t$$

Modelos sectoriales

$$\Delta Y_{it} = \Delta Y_{it-1} + [\beta_0 - \beta_2 Y_{t-1} + \beta_3 TCR_{t-1} + \beta_4 PRE_{t-1}] + u_t$$

### 3.5. ESCENARIO BASE 2008-2100

El escenario base contiene los siguientes supuestos sobre las variables exógenas:

- Los precios relativos de la energía constante.
- Precios relativos de los combustibles constantes.
- Tasa de crecimiento del capital de 4.5% anual.
- Tasa de crecimiento del empleo 1.5% anual.
- Tasa de crecimiento del tipo de cambio real 0.5% anual.

Bajo este escenario base se obtienen los siguientes resultados (Cuadros 8, 9, 10 y 11 y Gráficas 23, 24, 25 y 26):

#### CUADRO 8. ESCENARIO DE CRECIMIENTO DEL PIB

Probabilidad del escenario	Límite inferior	Media	Límite superior
60% de probabilidad	2.9	3.5	4.3
20% de probabilidad	1.0	1.8	2.6
10% de probabilidad	4.9	5.0	6.4

## CUADRO 9. ESCENARIO DE CRECIMIENTO DEL PIB AGROPECUARIO

Probabilidad del escenario	Límite inferior	Media	Límite superior
60% de probabilidad	1.6	2.2	2.8
20% de probabilidad	0.1	0.7	1.2
10% de probabilidad	2.9	3.8	4.8

## CUADRO 10. ESCENARIO DE CRECIMIENTO DEL PIB INDUSTRIAL

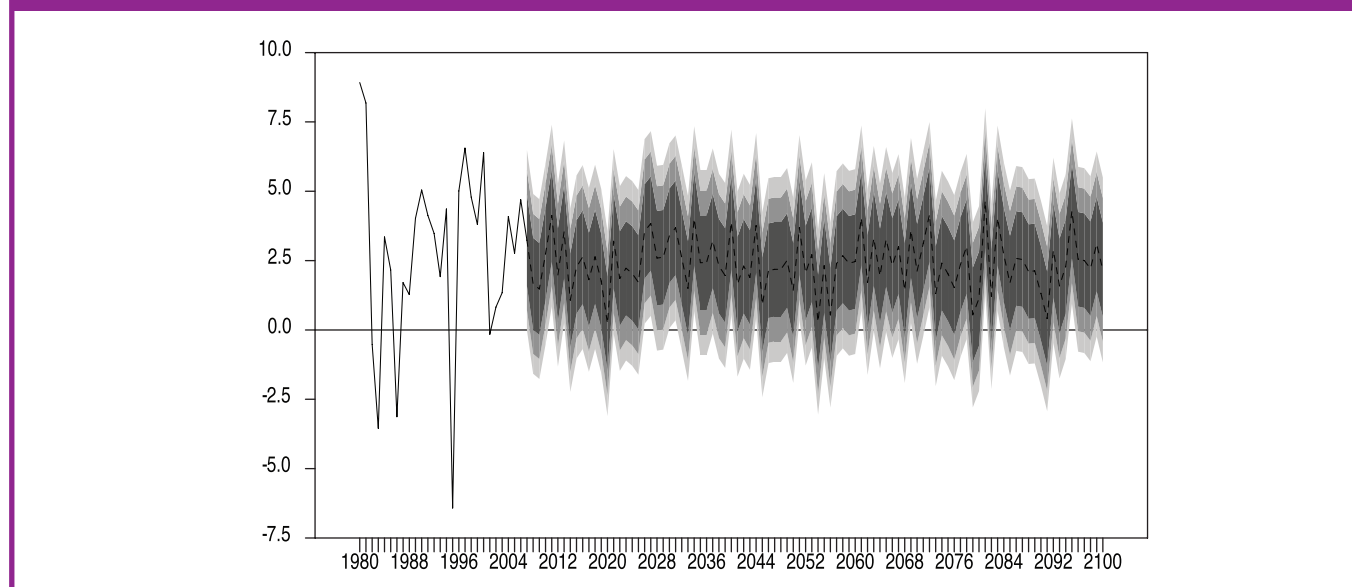
Probabilidad del escenario	Límite inferior	Media	Límite superior
60% de probabilidad	2.1	2.8	3.4
20% de probabilidad	0.5	1.1	1.7
10% de probabilidad	4.3	5.3	6.3

## CUADRO 11. ESCENARIO DE CRECIMIENTO DEL PIB SERVICIOS

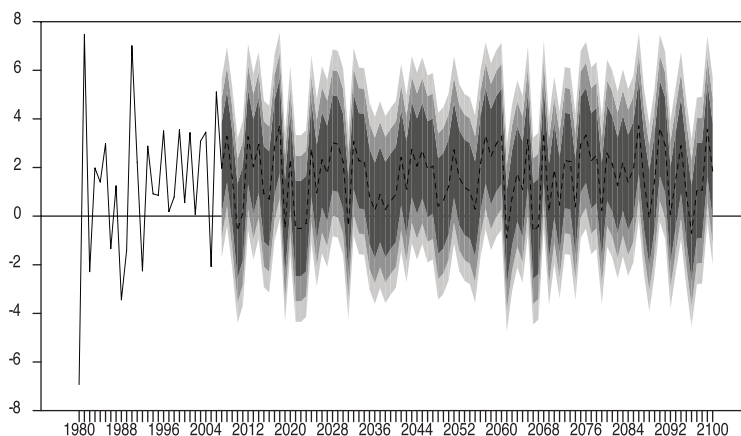
Probabilidad del escenario	Límite inferior	Media	Límite superior
60% de probabilidad	2.4	3.7	5.1
20% de probabilidad	0.7	1.4	2.0
10% de probabilidad	5.5	6.5	7.4

- Con una probabilidad del 60% se espera entonces que el ritmo de crecimiento de la economía nacional, durante el periodo de 2008 a 2100, se ubique en un rango de 2.9 a 4.3% anual, con un crecimiento promedio de 3.5%. Existe además un 20% de probabilidad de que este crecimiento se ubique entre 1 y 2.6% anual.
- En el caso del sector agropecuario el escenario más probable ubica su crecimiento promedio anual de 1.6 a 2.8% anual. Solo existe un 10% de probabilidad de que el sector acelere su crecimiento a un rango de 2.9 a 4.8%.
- El sector industrial mantendrá un ritmo ligeramente inferior al promedio de la economía nacional, fluctuando en un rango de 2.1 a 3.4% anual.
- Los servicios seguirán siendo el sector dinámico de la economía y su crecimiento será superior a los otros dos sectores con un ritmo del orden de 2.4 a 5.1% anual. En el caso en que la economía muestre un mejor desempeño entonces, este sector podría crecer incluso entre 5.5% y hasta 7.4% en promedio anual entre 2008 y 2100.

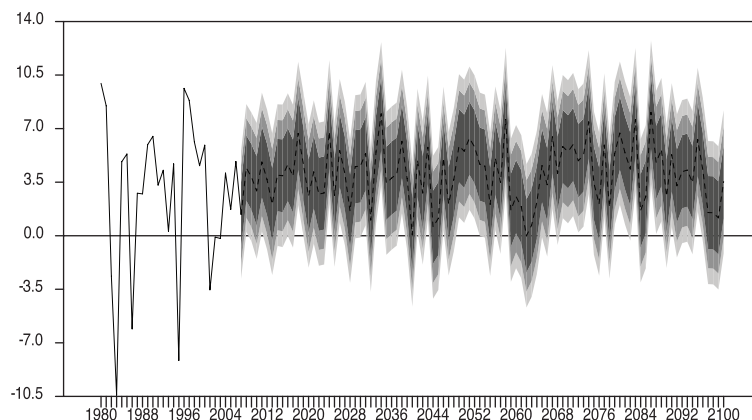
Gráfica 23. Fan Chart del PIB Nacional, 2008-2100



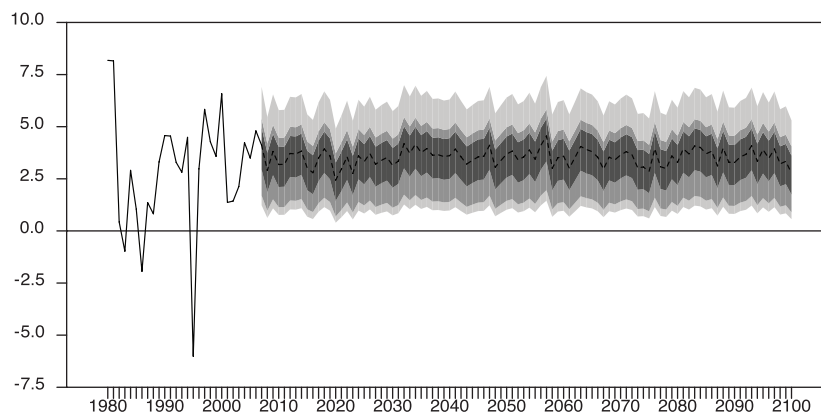
**Gráfica 24. Fan Chart del PIB Agropecuario, 2008-2100**



**Gráfica 25. Fan Chart del PIB Industrial, 2008-2100**



**Gráfica 26. Fan Chart del PIB Servicios, 2008-2100**



### Los números que determinan a la economía mexicana

Martín Rees (2000), astrónomo real británico, sostiene que las fuerzas que mantienen unido al universo conocido y explican la vida pueden reducirse a seis números (Rees, 2000). Esto es, las características físicas esenciales del universo pueden resumirse en seis números que tienen un valor preciso y que por ello permiten la vida. Un valor distinto no permitiría que existieran entonces las condiciones indispensables para la vida. Por ejemplo, el núcleo de un átomo de helio pesa el .993 de los protones y neutrones que lo integran mientras que el .007 restante se dispersa en forma de calor. Esto hace posible entonces la energía que emite el sol. Este número es además una función de la fuerza con las que se mantienen juntas las partículas del núcleo atómico. En el caso en que este número fuera menor, alrededor de .006, entonces no se unirían el protón y el neutrón y el universo sería de hidrógeno. Por el contrario, en el caso en que el número fuera mayor (.008) entonces la reacción sería tan rápida que los hidrógenos no hubieran sobrevivido a la gran explosión o *big ban*.<sup>12</sup>

Los otros cinco números que determina al universo son: aquel que mide la potencia de las fuerzas que cohesionan la estructura de los átomos dividido por la gravedad entre ellos, aquel que define la densidad del universo, el número que estima comportamientos de antigravedad, aquel que define las ondas de un universo en expansión y el número que define al número de dimensiones del universo conocido (Lemley, 2000).

En este sentido, diferentes números definen a otros universos. En el extremo, puede conjeturarse sobre la posible existencia de universos múltiples dependiendo de la combinación de números que definan a cada caso. De este modo, utilizando un símil puede considerarse que existen algunos números básicos que definen esencialmente el comportamiento de la economía mexicana (Galindo y Alanís, 2001). Esto es, existen algunas relaciones básicas de largo plazo entre las variables que permiten identificar a la economía mexicana y que pueden incluso utilizarse como anclas para determinar simulaciones y comportamientos futuros.

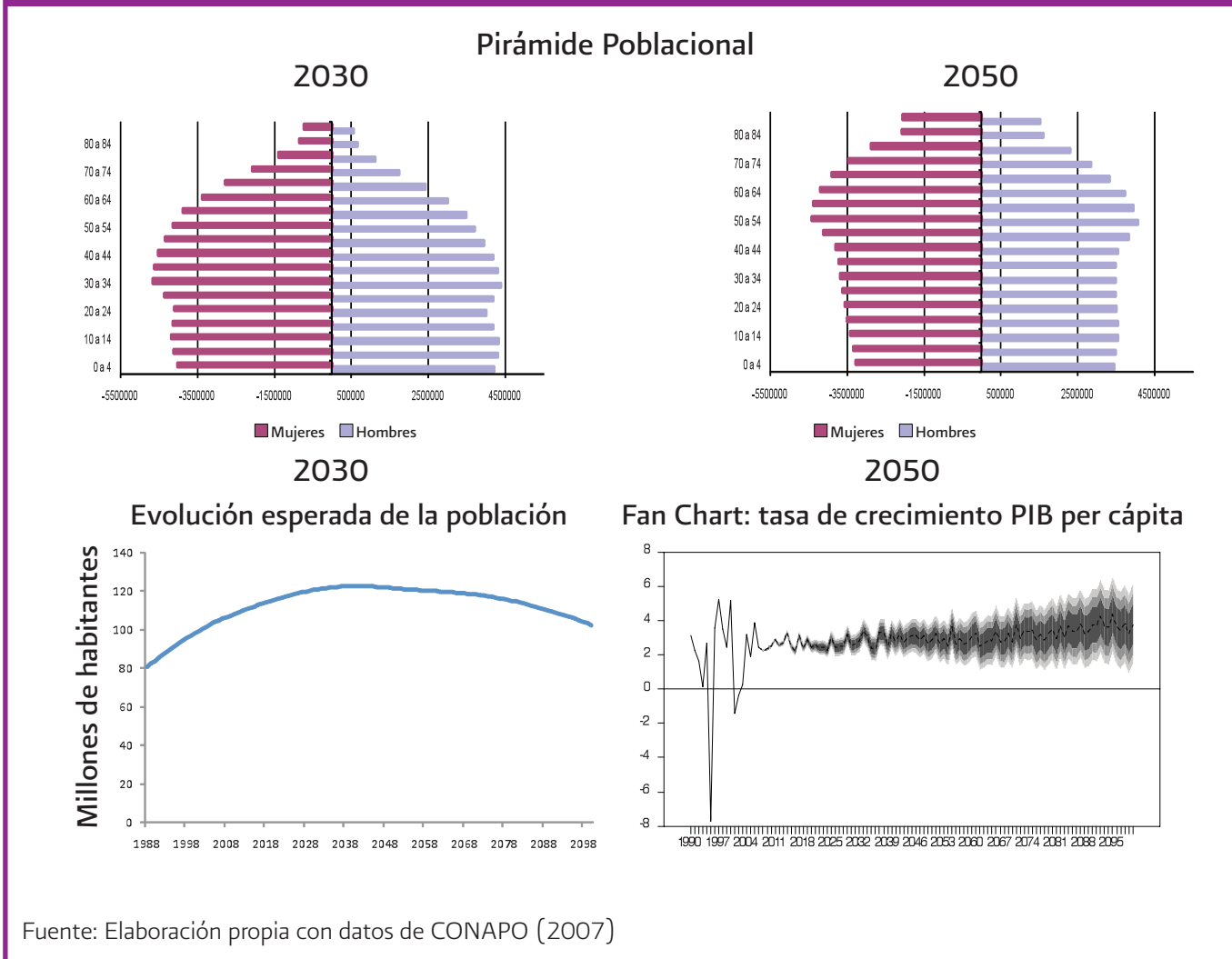
## 3.6. ESCENARIOS DEMOGRÁFICOS

La expansión demográfica en México se ha caracterizado por su fuerte concentración en un número reducido de entidades y por una tendencia a la urbanización en los últimos 30 años. Así, el 80% de la población se clasifica actualmente como urbana con una concentración desigual orientada a la región centro y el norte del país. Las proyecciones demográficas (CONAPO, 2008) indican que a partir del 2040 se iniciará el proceso de estabilización de la población mexicana profundizándose la brecha entre población urbana y rural.

- La población seguirá concentrándose en las áreas urbanas.
- Se espera que el crecimiento poblacional se traduzca en una distribución espacial heterogénea con grandes concentraciones en la región Norte-Noroeste del país, en donde se pronostican incrementos de la población hasta el 2050, mientras que en la región Sur-Sureste se espera que el crecimiento de la población sea negativo durante el período 2030–2050. Esto indica que se espera que la región Norte–Noroeste contenga gran parte de la población para el año 2050. Sin embargo, esta región es especialmente vulnerable al cambio climático, ya que en ella se registran las temperaturas más extremas del país.
- Las entidades que registrarán un mayor crecimiento en su población serán Quintana Roo, Baja California, Baja California Sur, Querétaro y Aguascalientes.
- Las entidades con reducciones son Veracruz, Zacatecas, Sinaloa, Distrito Federal, Oaxaca, Guerrero y Michoacán.
- Hacia el 2100 los estados de Guerrero, Baja California, Chihuahua, Oaxaca, Campeche, Aguascalientes, Michoacán, Nayarit y Sinaloa podrían registrar aumentos en los niveles de población menores incluso a un punto porcentual; el resto de las entidades registrarían una contracción en sus tasas de crecimiento poblacionales.
- Finalmente, también se han observado cambios históricos en la estructura de la población por edades (Figura 9). En general se observa que después del período de gran incremento en la población de los años 1980–1990, el crecimiento en la población se ha desacelerado, por lo que la estructura piramidal pronosticada tiende a mostrar una figura de pirámide invertida, reflejando una mayor cantidad de personas mayores. La evolución de la estructura de la población la hace más sensible y con mayores riesgos asociados al cambio climático.

<sup>12</sup> Para una explicación de estos números véase Lemley (2000).

Figura 9. Cambios históricos en la población por edades



Fuente: Elaboración propia con datos de CONAPO (2007)

#### 4. CONCLUSIONES

1. En general, en el contexto internacional se observa que no existe un proceso de convergencia económica en términos absolutos. Por el contrario, se puede identificar la formación de “clusters” de países que convergen en sus tasas de crecimiento. Ello ha derivado en un aumento de la brecha de desarrollo entre las economías más desarrolladas y aquellas con menor nivel de desarrollo.
2. En la economía mexicana durante las décadas de los sesenta y setenta del PIB registró un crecimiento sostenido acorde a su trayectoria de largo plazo. De 1960 a 1981 se observa un periodo de elevado crecimiento, con una tasa promedio del orden de 5% anual. Posteriormente, 1982 representa un punto de inflexión en el crecimiento tendencial de largo plazo del conjunto de la economía, que se identifica como un menor ritmo de crecimiento a largo plazo. Asimismo, junto con el descenso en la tasa de crecimiento también se ha presentado una mayor volatilidad de la serie.

3. El filtro HP (Hodrick y Prescott, 1997) aplicado sobre las tasas de crecimiento del PIB y la distribución de frecuencias de estas tasas permite obtener una trayectoria del crecimiento potencial de la economía mexicana. Así, se observa que la dinámica de crecimiento de la economía mexicana ha registrado con mayor frecuencia (50% de los casos) tasas en el rango de 2 a 5% anual. En un segundo término se ubican las tasas mayores a 5% sobre todo en el periodo de 1960 a 1981 (30% de los casos) y con una menor probabilidad se ubican las tasas menores a 2%, asociadas sobre todo a la década de los ochenta y la crisis de 1995. Atendiendo entonces a la distribución de frecuencias de las tasas de crecimiento, se puede considerar, con un 50% de probabilidad, que la tasa de crecimiento de la economía mexicana se puede ubicar en un rango de entre 2 y 5%.
4. Todos los sectores de la economía redujeron su tasa de crecimiento potencial durante la década de los ochenta respecto a la evolución que habían presentado en los sesenta y setenta. De este modo, se paso de niveles del 5% anual en la década de los sesenta y setenta a niveles de 2.5% a mediados de los ochenta.
5. La evolución del sector servicios muestra una fuerte correlación con el ciclo del conjunto de toda la economía y mantiene la misma evolución a lo largo del tiempo, reportando tasas de crecimiento potencial bastante similares. Sin embargo, en los últimos siete años el sector servicios ha logrado un mayor dinamismo ubicando su crecimiento potencial en casi 4%, que es superior al promedio de la economía.
6. El sector agropecuario, reporta tasas de crecimiento potenciales por abajo del resto de los sectores aunque desde finales de los noventa inicia una fase de recuperación importante, posiblemente explicada por el aumento de las exportaciones y de los precios de ciertos productos agropecuarios destinados al mercado de los Estados Unidos de Norteamérica. No obstante mantiene una brecha de 2 puntos porcentuales con el sector servicios.
7. Por su parte, el sector industrial de 1965 a 1985 muestra tasas de crecimiento de equilibrio bastante similares al conjunto de la economía y a partir de 1986 se aprecia un crecimiento sostenido por arriba del resto de los sectores. Sin embargo, desde finales de los noventa se ha caracterizado por una clara tendencia descendente en su crecimiento potencial.
8. Con una probabilidad del 60% se espera que el ritmo de crecimiento de la economía nacional, durante el periodo de 2008 a 2100, se ubique en un rango de 2.9% a 4.3% anual. Ello sugiere que se espera un crecimiento promedio de 3.5% (o quizá a un poco más bajo alrededor de 3% atendiendo a las condiciones actuales). Existe un 20% de probabilidad de que este crecimiento se ubique entre 1% y 2.6% anual.
9. En el caso del sector agropecuario el escenario más probable ubica su crecimiento promedio anual entre 1.6% y 2.8% anual. Solo existe un 10% de probabilidad de que el sector acelere su crecimiento a un rango de 2.9% a 4.8%. El sector industrial mantendrá un ritmo ligeramente inferior al promedio de la economía nacional, fluctuando en un rango de 2.1% a 3.4% anual. Los servicios seguirán siendo el sector dinámico de la economía y su crecimiento será superior a los otros dos sectores con un ritmo del orden de 2.4% a 5.1% anual. En el caso en que la economía muestre un mejor desempeño entonces, este sector podría crecer hasta entre 5.5% y 7.4% en promedio anual entre 2008 y 2100. Estos ritmos de crecimiento modificarían la composición sectorial de la economía.
10. En los escenarios demográficos indican que la población crece a tasas cada vez menos aceleradas y que alcanzará su punto máximo a mediados de la década del 2040, con una población alrededor de los 130 millones de habitantes. A partir de la década del 2050 se pronostica una tasa de crecimiento promedio anual de la población negativa de 0.34%, alcanzando un nivel de alrededor de 102 millones de habitantes en el año 2100, similar al valor reportado en el año 2004.

11. La población seguirá concentrándose en las áreas urbanas. Por ello resulta indispensable la instrumentación de políticas orientadas al desarrollo del transporte de masas y al uso de energías limpias y tecnologías que consuman menos energía, con la finalidad de lograr un desarrollo sustentable en ciudades con gran aglomeración de población.
12. Se espera, además, que el crecimiento poblacional se traduzca en una distribución espacial heterogénea de la población con grandes concentraciones en la región Norte-Noroeste del país, en donde se pronostican incrementos de la población hasta el año 2050, mientras que en la región Sur-Sureste se espera que el crecimiento de la población sea negativo durante el período 2030–2050. De este modo, se espera que la región Norte–Noroeste contenga gran parte de la población para el año 2050. Sin embargo, esta región es especialmente vulnerable al cambio climático, ya que en ella se registran las temperaturas más extremas del país. Además, dicha región no dispone de recursos hídricos para abastecer la creciente demanda de agua, situación que se agravará bajo los efectos del cambio climático. En contraste, la región Sur–Sureste del país cuenta con abundantes recursos hídricos, sin embargo, los pronósticos muestran una reducción en su población para el año 2050. Por lo anterior, es indispensable la instrumentación de políticas encaminadas al desarrollo sostenible en regiones con escasos recursos hídricos.
13. La estructura de la población por edades se ha modificado. Así, después del un período de gran incremento en la población durante los años 1970–1990, la tasa de natalidad ha disminuido de manera considerable. Por lo anterior, se espera que en un futuro la población joven sea cada vez menor, mientras que la población de adultos mayores mostrará un incremento significativo.





## PARTE 3: LOS IMPACTOS ECONÓMICOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN MÉXICO

### 3.1. EL SECTOR AGROPECUARIO

#### Puntos fundamentales

El sector agropecuario es una actividad fundamental en la economía mexicana atendiendo a su participación en el PIB, al empleo directo e indirecto que genera y a su asociación con los ingresos de los agentes económicos en zonas rurales, incluyendo a una importante parte de la población con bajos ingresos, y observando su contribución a la provisión de alimentos a la población e insumos básicos a otros sectores.

Los impactos del cambio climático en las actividades agropecuarias en México son significativos y asimétricos y tienen un comportamiento no lineal y con diferencias importantes por clima y por Estado aunque sus efectos son crecientes en el tiempo y se incrementan exponencialmente. Ello es consistente con la evidencia internacional donde se observa que los mayores impactos son diferenciados dependiendo del cultivo, agro-climas específicos, altitud, agua disponible, sensibilidad al CO<sub>2</sub> y de los procesos de adaptación y de innovación tecnológica.

Un aumento ligero de la temperatura puede favorecer las cosechas en algunas áreas como el centro y noreste del país mientras que los cambios negativos se concentran mayoritariamente en el oeste y el sur del país. Los efectos son heterogéneos por cultivo siendo los más desfavorecidos el trigo y la soya y los más favorecidos la sandía, el sorgo y el maíz. Se observa además que es mayor la sensibilidad de los cultivos a la temperatura que a la precipitación. Asimismo, los impactos del agua deben enmarcarse en el contexto de los cambios en la temperatura y el CO<sub>2</sub>. Por ejemplo, se espera que el aumento de la temperatura incremente los requerimientos de irrigación, pero la disponibilidad de agua para esta función puede verse afectada por alteraciones en la precipitación y por reducción en la humedad del suelo resultado de mayor evapotranspiración. De este modo, mayores aumentos de la temperatura implicarán una generalización de impactos negativos significativos.

Las estimaciones realizadas para identificar los impactos del cambio climático en el sector agropecuario incluyen modelos del tipo de una función de producción, del tipo Ricardiano y de volatilidad condicional.

Los principales resultados indican que, para el modelo del tipo de función de producción y en el peor escenario climático (A2), los costos totales del sector agropecuario respecto al PIB al 2100 para los productos perennes es de 1.72%, con tasa de descuento del 4% y de 11.26% con tasa de descuento del 0.5%. Por su parte, los costos del índice de productos cíclicos oscila entre 0.02% y 0.21% del PIB al 2100 con tasas de 4% y 0.5% respectivamente. Destacan, en este contexto, las pérdidas potenciales en maíz y que, para la década 2050s, los costos totales son menores que hacia finales de siglo. Estos resultados muestran la presencia de una curva de costos no lineal pero creciente en el tiempo asociada a los cambios climáticos. De este modo, incluso ganancias temporales de corto plazo se erosionarán en el futuro. Por su parte, en el modelo de tipo Ricardiano se observa que la pérdida de rendimientos por tipo de cultivo al 2100 puede llegar al 33% y en renta de la tierra es de aproximadamente el 24%. Además existe evidencia de un aumento del riesgo en el sector agropecuario que modifica las conductas de los agentes económicos para administrar este riesgo creciente.

Esta evidencia indica entonces que el cambio climático se está convirtiendo en un factor relevante para determinar los ingresos de los productores agrícolas en México y la seguridad alimentaria y lo será aun más en el futuro. En este contexto, se observa que existen procesos de adaptación importantes en algunos estados que incluyen cambios en los patrones de siembra, en los tipos de cultivos, en mayores inversiones en infraestructura, en los usos de nuevas tecnologías, uso de información climática o de usos más intensivos de fertilizantes o agua que permiten amortiguar y retrasar los impactos climáticos. Sin embargo, se observa que estos procesos de adaptación no se están dando de manera uniforme en todos los estados y son generalmente individuales, ineficientes y no sustentables en el largo plazo por lo que es indispensable reordenarlos adecuadamente.

El impacto del cambio climático se deriva no solamente de la tendencia general de temperatura y precipitación, sino también del aumento en la variabilidad climática que afecta la productividad y los ingresos de las actividades agrícolas lo que induce un mayor ambiente de riesgo. Esto conduce a que los productores prioricen estrategias de reducción de riesgo, por ejemplo, diversificando sus cultivos, y que no utilicen estrategias maximizadoras de ganancias lo que impacta negativamente su nivel de producto. En este contexto, se estima que políticas incentivan exclusivamente una mayor producción serán vistas como ineficientes por los agricultores que buscan también reducir su riesgo.

Desde la óptica de la política pública es entonces necesario instrumentar una estrategia de adaptación que haga más eficiente y sustentable al sector en el largo plazo tomando en cuenta las particularidades y sensibilidades por estado. De este modo, se puede identificar a las regiones con mayores riesgos en determinados tipos de cultivos y desarrollar una agenda de adaptación basada en una transición de la producción agropecuaria pasando los cultivos más sensibles al altiplano, apoyar el fomento y la disponibilidad de variedades genéticas mejor adaptadas, prácticas de manejo que fortalezcan la fertilidad y capacidad de retención de agua de los suelos y reduzcan la erosión, mayor inversión en infraestructura y toda la cadena agroindustrial, apoyar la innovación tecnológica y fomentar una mejor cobertura de riesgos para el sector.

Estos resultados representan una agregación y son sólo indicativos de los impactos que generan los diferentes escenarios y en todo caso se requiere investigación más puntual para diversas zonas geográficas. Los costos pueden reducirse significativamente a través de procesos de adaptación activamente desarrollados de forma provisoria pero también puede aumentar significativamente en el caso que se consideren simultáneamente los impactos de la temperatura y los cambios en la precipitación o incluso de los eventos extremos.

## 1. INTRODUCCIÓN

El sector agropecuario es una actividad fundamental en la economía mexicana atendiendo a su participación en el PIB, al empleo directo e indirecto que genera, a su asociación con los ingresos de los agentes económicos en zonas rurales y a su contribución al suministro de alimentos y de insumos para otros sectores. Los impactos del cambio climático en las actividades agropecuarias en México son significativos y asimétricos, con diferencias importantes por clima y por Estado y sus efectos son no lineales y crecientes en el tiempo. Ello es consistente con la evidencia internacional donde se observa que los mayores impactos son diferenciados dependiendo del cultivo, de los agro-climas específicos, de la altitud, del agua disponible, de la sensibilidad al CO<sub>2</sub> y de los procesos de adaptación y de innovación tecnológica. Los resultados presentados permiten además identificar la sensibilidad por Estado y por cultivo a los impactos del cambio climático. De este modo, se puede identificar las regiones con mayores riesgos en determinados tipos de cultivos y buscar desarrollar entonces una agenda de adaptación basada en cambio de cultivos, inversión en infraestructura, semillas mejoradas y fertilizantes y una mejor cobertura de riesgos. La evidencia disponible muestra que el cambio climático se está convirtiendo en un factor relevante para determinar los ingresos de los productores agrícolas en México y que lo será aun más en el futuro.

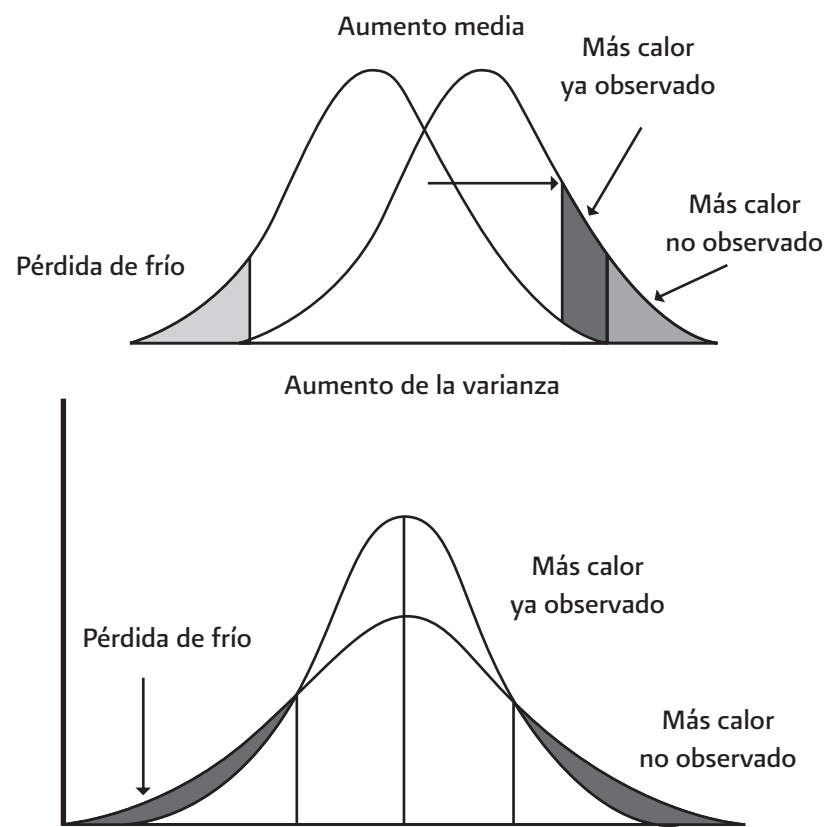
La importancia de los impactos climáticos en el sector agropecuario es consistente con la evidencia disponible a nivel internacional (IPCC, 2007). No obstante ello, persiste un intenso debate sobre la magnitud de los impactos positivos y negativos del cambio climático en las actividades agropecuarias ya que en general se observa que los efectos son muy variados y heterogéneos por países y regiones e incluyen desde impactos netos benéficos hasta pérdidas catastróficas (Mendelsohn y Neumann, 1999; Kabubo y Karanja, 2007; Adams, 1989; Mendelsohn *et al.*, 1994; y Schlenker, 2005a y 2005b). Ello es consecuencia de que los impactos netos observados dependen, además del clima, de un conjunto de factores tales como los procesos de adaptación, el nivel de tecnificación e irrigación, cambio de cultivos, fertilizantes, seguros o innovación tecnológica (Frankhauser, 1995; Doering *et al.*, 2002). Así, no obstante que existe un gran avance en la literatura a nivel global para evaluar los efectos potenciales del cambio climático en las actividades agropecuarias persiste aun una importante incertidumbre sobre los impactos regionales que muestran un rango de variabilidad substancial (Rosenzweig y Parry, 1994, Chang, 2002 y Reilly *et al.*, 2003). En este sentido, identificar los impactos del cambio climático en el sector agropecuario resulta fundamental para identificar los impactos netos agregados totales del cambio climático para México pero tiene aun un componente de incertidumbre importante. Así, el objetivo de este capítulo es estimar los impactos del cambio climático en el sector agropecuario identificando sus niveles de sensibilidad.

## 2. LOS IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL SECTOR AGROPECUARIO

Los impactos esperados del cambio climático sobre el sector agropecuario son ciertamente impresionantes a lo largo de este siglo aunque muestran diferencias importantes en el tiempo y por regiones (Stern, 2007). En efecto, los impactos climáticos en el sector agropecuario se asocian fundamentalmente a los aumentos del CO<sub>2</sub> y de la temperatura, a los cambios en los patrones de precipitación y disponibilidad de agua y a la presencia anómala de eventos extremos. Estos impactos deben identificarse en un contexto más amplio considerando que la producción o el rendimiento del sector agropecuario depende, además, de otro conjunto de factores tales como la combinación de insumos, fertilizantes, tecnología, irrigación, el tipo de administración de riesgos, pesticidas, el trabajo y las características del suelo y del clima (Carlson *et al.*, 1993; Doering *et al.*, 2002). En este sentido, identificar los impactos climáticos requiere considerar adecuadamente los efectos de las otras variables en la evolución de las actividades agropecuarias o la trayectoria tendencial esperada. Asimismo, los cambios climáticos son un fenómeno estocástico (Doering *et al.*, 2002) y en ese sentido identificar sus impactos resulta más complejo como puede apreciarse en la Gráfica 27.

Esto es, un aumento de la temperatura media recorre el conjunto de la distribución climática a la derecha. De este modo, es probable que sigan observándose climas similares y que los aumentos de temperatura no observados se circunscriban a los extremos de la cola derecha mientras que los climas fríos eliminados sólo sean aquellos de la cola izquierda de la distribución. Estos impactos pueden ser además intensificados por aumento de la varianza de la distribución, ilustrada en la segunda parte de la Gráfica 27. Puede incluso considerarse que, dentro de los límites de tolerancia de los cultivos, los impactos de la temperatura, bajo una distribución normal, son positivos al lado izquierdo de la distribución y sólo son negativos en el lado derecho.

**Gráfica 27. Impactos en los cambios en la media, la varianza, y la media sobre la probabilidad de ocurrencia de tipos de clima específicos**



Fuente: Doering et al. (2002)

La evidencia disponible sobre los impactos del cambio climático sobre el sector agropecuario es ciertamente compleja y disímil aunque puede sintetizarse en los siguientes puntos y un resumen se presenta en el Cuadro 12.

## CUADRO 12. RESUMEN DE IMPACTOS EN LA AGRICULTURA

Autores	Darwin et al., (1995)	Fischer et al., (2002)	Parry et al., (1999)	Rosenzweig et al., (1995)
METODOLOGÍA	POSIBLES EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA PRODUCCIÓN AGRÍCOLA MUNDIAL			
		Generaron estimaciones del número de personas en riesgo de hambre		
	Examinaron Cambios en la producción global de granos básicos			
			Uso de un modelo de rendimientos de cultivos vinculado a un modelo de comercio mundial de alimentos	
	Uso de un sistema de información geográfica y un modelo económico de equilibrio general	Se emplea una base de datos global de recursos de la tierra asociado a la producción potencial del cultivo		
RESULTADOS	Indica una disminución en la producción de los no granos con TGM por encima de 4°C. Aplicándose lo mismo para el total de los cultivos. Esta reducción es compensada por un aumento en la producción de trigo, por encima de los 4°C, en Canadá y Estados Unidos de Norteamérica.	El número de personas en riesgo de padecer hambre aumenta cuando TGM incrementa más allá de 3°C	Impactos (cambio porcentual, alrededor del 13%, en el número de personas en riesgo de hambre) con una TGM de 1°C; el impacto aumenta bruscamente cuando la temperatura está por encima de los 2°C. Los resultados son para los promedios de las décadas de los cincuenta y ochenta de este siglo, considerando la existencia de una mayor población	Fuerte impacto (cambio porcentual, alrededor del 12%, en el número de personas en riesgo de hambre) cuando la TGM es superior a los 4°C.
	Todos los estudios indican fuertes variaciones a nivel regional. Por ejemplo, se estima que aumentará aún más la existente disparidad en la producción de cultivos entre los países desarrollados y en desarrollo.			

NOTA: TGM=Temperatura Media Global. Fuente: Hitz y Smith (2004)

1. Un aumento inicial de la concentración del CO<sub>2</sub>, sin considerar su impacto en temperatura y por ende en otros efectos climáticos, tiene un impacto positivo significativo sobre la producción y el rendimiento del sector agropecuario (Amthor, 2001). Estos impactos pueden ser substanciales como lo muestran estimaciones que sugieren que doblar las concentraciones de CO<sub>2</sub> puede aumentar hasta en un 33% la producción agrícola de ciertos cultivos (Kimball, 1983). Además, mayores concentraciones de CO<sub>2</sub> incrementan el rendimiento de los bosques (Irland et al., 2001; Sohgen y Sedjo, 2005). En este sentido, mayores niveles de CO<sub>2</sub> en la atmósfera conllevaran, al menos en los próximos años, a un aumento de la producción agropecuaria y forestal a nivel global aunque con resultados muy heterogéneos por países y regiones. Incluso se estima que, a nivel global, predominen los impactos positivos en la producción agrícola de un incremento del CO<sub>2</sub> y con aumentos simultáneos de temperatura menores a 1.5 grados<sup>13</sup>. Por ejemplo, se espera que un aumento de las concentraciones de CO<sub>2</sub> a 550 ppm ocasione un aumento de la producción de entre 0% y 20% en algunos cultivos (Ainsworth et al., 2004; Long et al., 2004) mientras que para bosques concentraciones de 550

<sup>13</sup> Las temperaturas citadas en este documento son en la escala Celsius si no existe indicación específica.

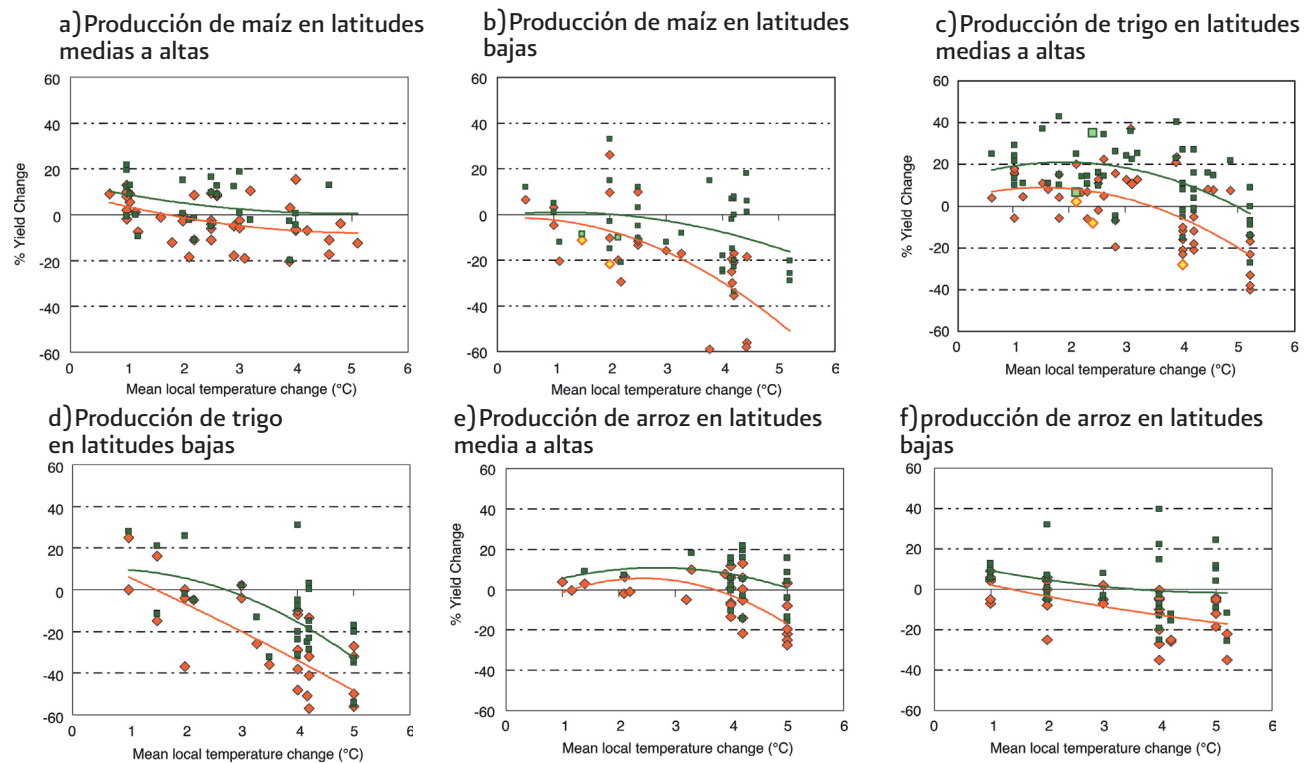
ppm ocasionarán un aumento de biomasa de 0% a 30%<sup>14</sup> (Nowak *et al.*, 2004; Korner *et al.*, 2005; Norby *et al.*, 2005). Asimismo, se espera un aumento de la productividad en las plantas, originado en el aumento de CO<sub>2</sub>, hasta el 2030 (Hanley y Spash, 1993).

En el extremo, se argumenta que una estabilización de las concentraciones de CO<sub>2</sub> en valores aproximados de 550 ppm puede incluso reducir los costos de alimentación global (Arnell *et al.*, 2002 y Tubiello y Fisher, 2006). No obstante, una concentración de 550 ppm de CO<sub>2</sub> también traerá un aumento de temperatura y otras consecuencias negativas derivadas tales como eventos extremos.

2. Un aumento de la temperatura tiene, dependiendo de la temperatura límite y del clima inicial (Mendelsohn y Neumann, 1999), un impacto en principio positivo en la producción y en los rendimientos; sin embargo, pasando ciertos límites de temperatura los impactos se hacen negativos (Aggarword y Mall, 2002). De este modo, los impactos de la temperatura son más notables en regiones calientes, de bajas latitudes y en áreas semiáridas (Adams, *et al.*, 1998). Este resultado puede compensarse o es variable dependiendo del cultivo, altitud, agua disponible y de los procesos de adaptación y de innovación tecnológica (Antle, *et al.*, 2004). No obstante, en la mayoría de los resultados empíricos se reconoce que los cambios en la temperatura son, en general, más importantes que los cambios en la precipitación (Kabubo y Karanja, 2007). Esta relación cóncava entre la producción y/o los rendimientos agrícolas con respecto a la temperatura se observa en la Gráfica 28.
3. Los cambios en los patrones de precipitación tienen un impacto importante en la producción y los rendimientos agropecuarios que puede también representarse como una función cóncava (Doering *et al.*, 2002). De este modo, en las curvas de rendimiento teórico por temperatura y disponibilidad del agua, un aumento inicial de la cantidad de agua disponible tiene impactos positivos en la producción y en los rendimientos agropecuarios, llega a una cantidad óptima, para después caer paulatinamente. De este modo, los impactos del agua deben entenderse en forma conjunta con los cambios en la temperatura y el CO<sub>2</sub> ya que en alguna medida los condicionan; por ejemplo, los impactos positivos del aumento inicial de la temperatura y el CO<sub>2</sub> dependen de la disponibilidad de agua (Fleisher, Lichtman y Mendelsohn, 2008). En este sentido, se espera que los requerimientos, a nivel global, de irrigación como consecuencia del calentamiento global, aumenten entre 1 y 3 % para el 2020 y 5 y 8% para el 2070 (IPCC, 2007). Así, no obstante, que el impacto de la temperatura es mayor que el agua; la creciente demanda de agua se puede convertir en una restricción fundamental en los próximos años (IPCC, 2007). En este sentido, los efectos del clima puede acentuarse como consecuencia del *stress* hídrico (IPCC, 2007). Debe además considerarse el impacto de la disponibilidad de agua y no sólo el de la precipitación. Esto es, un clima más caliente reduce la disponibilidad de agua al aumentar la evapotranspiración, reduciendo la humedad del suelo y la infiltración. Un motivo de peligro adicional para la agricultura está relacionado con la tendencia a tormentas más intensas o ciclones tropicales de mayor magnitud.

<sup>14</sup> La inacción es muy importante para medir los impactos en bosques (IPCC, 2007.); sin embargo, se desconoce la trayectoria específica de los daños en acervos de bosques ya que ello depende de la trayectoria seleccionada (Schneider, 1997).

**Gráfica 28. Efecto del cambio climático de la temperatura media sobre la producción de maíz, trigo y arroz**



Fuente: (IPCC) 2007. Notas Sensibilidad del maíz, trigo y arroz a cambios en la temperatura. Incluye cambios sin adaptación (puntos naranjas) y con adaptación (puntos verdes).

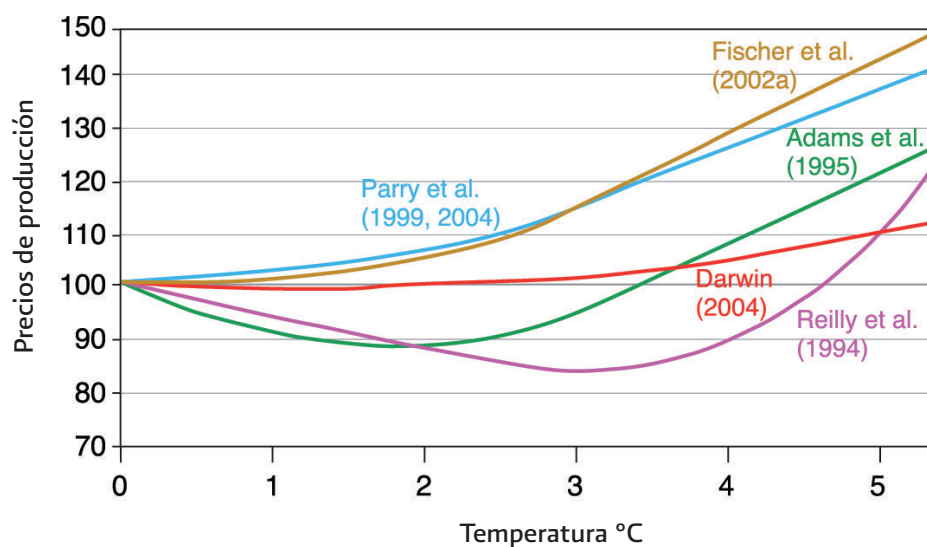
- Los impactos del cambio climático en el sector agropecuario son fuertemente diferenciados de acuerdo a las estaciones del año ya que, por ejemplo, los límites de tolerancia de los cultivos no se alcanzan en las temporadas frías (Deschenes y Greenstone, 2006). Por ejemplo, en Kenia se observa que un aumento de la temperatura en diciembre incrementa la productividad agrícola y en verano la disminuye mientras que en general una mayor cantidad de lluvia aumenta la productividad (Kabubo y Karanja, 2007). En este sentido, los impactos específicos son fuertemente dependientes de los agro-climas y de la sensibilidad al  $CO_2$  lo que incluye un nivel de incertidumbre adicional a las proyecciones (Long *et al.*, 2005).

La evidencia disponible muestra entonces que los impactos del cambio climático sobre las actividades agropecuarias son significativos aunque dependen de un conjunto de factores que conducen a resultados extremadamente heterogéneos por país y regiones. Por ejemplo, se estima que un aumento de 1 y 3 grados de temperatura en latitudes medias y altas tendrá un impacto positivo en la agricultura bajo el supuesto de disponibilidad de agua (IPCC, 2007). Las excepciones de estos efectos positivos se concentran en África y algunas regiones tropicales y semiáridas y altitudes bajas (Adams, *et al.*, 1999, Rosenzweig y Iglesias 1994, Smith *et al.*, 1996 e IPCC, 1996). Estos resultados son similares en varios análisis; por ejemplo, Tol (2002) argumenta que la producción agrícola aumenta en los países de la OCDE en 1% y en otros se reduce con una alta variabilidad.

Asimismo, Mendelsohn y Neumann (1999) estimaron que un calentamiento de entre 1.5 y 2.5 grados tendría un beneficio neto y Downing (1992) encuentra que en áreas arables sube la producción y en áreas áridas se reduce. Por el otro lado, se observa que un aumento de más de 3 grados de temperatura tiene, en todas las regiones, impactos negativos (IPCC, 2007). Ello es relativamente consistente con la proyección de FAO de una caída del ritmo de producción agrícola mundial en el futuro (IPCC, 2007).

De este modo, los resultados netos por regiones con aumentos de la temperatura de menos de tres grados son muy heterogéneos con un impacto positivo en las regiones medias y altas del planeta y efectos negativos en las regiones tropicales y en países de África. Por ejemplo, Fisher *et al.*, (2002 y 2005) estiman que los daños en el sector agrícola, a nivel global, para el 2080 oscilan entre -1.5% y 2.6% del PIB con variaciones regionales considerables. Por otro lado, Cline (1992) y Mendelsohn *et al.* (1994) estimaron por separado el costo del calentamiento global de 2.5 grados cercano a 1% del PIB para Estados Unidos de Norteamérica<sup>15</sup>. Asimismo, diversos estudios estiman impactos en precios importantes de los cereales (IPCC, 2007) lo que sugiere que aumentos moderados de la temperatura global media pueden derivar en una producción de cultivos y ganado más alta y en un pequeño decremento en los precios de los alimentos, mientras que cambios en la temperatura global media en el rango de 4 a 5 grados puede traducirse en reducciones netas en la producción y un incremento pronunciado en los precios (Gráfica 29).

Gráfica 29. El efecto del cambio en la temperatura media sobre el precio de los cereales



Fuente: (IPCC) 2007.

Así, la evidencia sobre los impactos de la temperatura en la agricultura es heterogénea. Por un lado, se espera que los aumentos de temperatura incrementen los rendimientos entre 5% y 20% durante las primeras décadas del siglo con efectos positivos aunque más pausados posteriormente (Adams, *et al.*, 2003, Polsky *et al.*, 2003, Rosenberg, *et al.*, 2003, Tsvetsinskaya, *et al.*, 2003, Antle, *et al.*, 2004, Thompson *et al.*, 2005); ello estará acompañado de un aumento de las ganancias anuales del sector de 3.4% (Deschenes y Greenstone, 2006).

<sup>15</sup> Además, en Estados Unidos de Norteamérica se observa un aumento tendencial de los rendimientos de entre 1 o 2% anual (Troyer, 2004) asociado, fundamentalmente, a factores económicos que puede compensar parcialmente la caída en el sector (IPCC, 2007).



Por el otro lado, Mendelsohn, *et al.*, (1994) encuentran que los impactos climáticos son no lineales y cambian también por estación en Estados Unidos de Norteamérica; de este modo un aumento de 5 grados de temperatura genera una pérdida de 45% en el valor de la tierra aunque las ganancias se mantengan relativamente estables. Además, otros estudios sugieren que se reduce 17% la producción con un grado de temperatura anómalo (Lobell y Asner, 2003) y que el exceso de lluvias tiene impactos negativos (Rosenzweig *et al.*, 2002); incluso se espera que se presente un relativo rezago agrícola a partir del 2030 (Reilly, *et al.*, 2003).

Para los países subdesarrollados se espera, en los próximos años, una reducción de la producción por hectárea aunque con un aumento paulatino de 0.6% promedio de la superficie irrigada para el 2030 que podría compensar parcialmente la disminución de los rendimientos (IPCC, 2007; Bruinsma, 2003). En particular, Mendelsohn *et al.* (2000) estiman que para África los costos del cambio climático en la agricultura oscilan entre 0.13% y 2% del PIB para el 2100 eliminado el impacto de la reducción del peso relativo de la agricultura en el PIB. Asimismo, Seo *et al.* (2005) encuentra impactos negativos de la temperatura pero positivos para la lluvia para Sri Lanka. Mientras que Mendelsohn *et al.* (2003) para Brasil encuentra que aumenta el ingreso *per capita* en la agricultura como consecuencia del aumento en la temperatura. En este sentido, se observa que los impactos negativos del cambio climático sobre la agricultura más inmediatos se concentran fundamentalmente en África y en menor medida en otras regiones áridas y semiáridas del planeta y en algunas regiones tropicales para la segunda mitad del siglo; además se observa la presencia de costos importantes asociados a eventos extremos e incluso impactos significativos en las actividades pecuarias.

Las predicciones para América Latina muestran la importancia del impacto de la temperatura en la producción y los rendimientos. En estos impactos se observa también la asimetría y las diferencias por regiones aunque predominan los efectos negativos con el aumento de la temperatura. En particular, destaca por su importancia para la seguridad alimentaria de la región que la producción de maíz se reducirá en 15% en promedio para el 2055 basado sobre proyecciones de HadCM2 (Stern, 2007) y quizá hasta 30% para el 2080 (Parry *et al.*, 2004).

Los impactos agregados de la agricultura del cambio climático son además más complejos atendiendo a los efectos combinados de reducción en la disponibilidad de agua, aumento de temperatura e inundaciones o eventos extremos<sup>16</sup> (Chiotti y Johnston, 1995). Por ejemplo, se estima que el aumento de la temperatura junto con una reducción de la disponibilidad de agua consecuencia tanto de una menor precipitación o de una mayor evotranspiración puede traducirse en una disminución significativa de los rendimientos. Algunas estimaciones (IPCC, 2007) incluso consideran que los daños en la producción agrícola y en los bosques son mayores como consecuencia de los eventos extremos. Asimismo, se esperan impactos negativos en la producción pecuaria asociado a la presencia de sequías (Cuadro 13).

<sup>16</sup> Falta mucha investigación en los procesos de interacción entre la planta y suelo (Ritchie y NeSmith, 1991).



### CUADRO 13. IMPACTOS CUANTIFICADOS DE SEQUÍAS SELECCIONADAS EN ÁFRICA SOBRE GANADO, 1981 A 1999

Fecha	Lugar	Mortalidad y especies	Fuente
1981-84	Botswana	20% de rebaño nacional	FAO, 1984, citado en Toulmin, 1986.
1982-84	Níger	62% de ganado nacional	Toulmin, 1986
1983-84	Etiopía (Borana Plateau)	45-90% de terneros, 45% de vacas, 22% de ancianos	Coppock, 1994
1991	Norte de Kenya	28% de ganado, 18% de ovinos y caprinos	Surtech, 1993, citado en Barton y Morton, 2001.
1991-93	Etiopía (Borana)	42% de ganado	Desta y Coppock, 2002
1993	Namibia	22% de ganado, 41% de caprinos y ovinos	Devereux y Tapscott, 1995
1995-97	Gran Cuerno de África (promedio de 9 áreas pastorales)	20% de ganado, 20% de ovinos y caprinos	Ndikumana <i>et al.</i> , 2000
1995-97	Sur de Etiopía	46% de ganado, 41% de ovinos y caprinos	Ndikumana <i>et al.</i> , 2000
1998-99	Etiopía (Borana)	62% de ganado	Shibru, 2001, citado en Desta y Coppock, 2002

Fuente: (IPCC), 2007.

De este modo, a nivel agregado puede identificarse la presencia de tres tendencias dominantes durante el siglo XXI en los impactos estimados del cambio climático en el sector agropecuario:

1. El impacto inicial del cambio climático en los países desarrollados con temperaturas frías y templadas tendrá un efecto positivo que se verá compensado, a nivel agregado, por el impacto negativo en los países subdesarrollados, primordialmente África donde se observará un aumento de la temperatura sobre niveles ya elevados con fuertes restricciones de agua.
2. El aumento de la temperatura, de entre 1 y 3°C, tiene efectos diferenciados importantes de acuerdo a las condiciones por país y región. Esto es, aumentos, de hasta tres grados de temperatura, pueden incidir positivamente en los rendimientos de la producción agropecuaria de contarse con agua disponible en varias regiones. Así, en regiones altas con climas fríos y disponibilidad de agua se observará un aumento de los rendimientos. Por el otro lado, en climas cálidos y bajos con escasez de agua se traducirán en reducciones en los rendimientos. Ello debe considerar también que los impactos por estaciones son distintos. Sin embargo, un aumento de la temperatura superior a 3 grados centígrados tiene impactos negativos en prácticamente todas las regiones del planeta. Desde luego, aumentos de temperatura por arriba de los cinco grados resultan catastróficos.

3. Los impactos del cambio climático en el corto plazo son fuertemente dependientes de los efectos combinados de aumento de CO<sub>2</sub>, aumento en la temperatura, disponibilidad de agua y formas y mecanismos de adaptación. La disponibilidad de agua y los mecanismos de adaptación como cambiar cultivos, incluir riego, utilizar variedades genéticas mejor adaptadas a las condiciones climáticas, modificar prácticas de manejo para fortalecer la fertilidad y la capacidad de retención del agua de los suelos, o diversos tipos de progreso técnico puede retrasar o incluso mejorar temporalmente los rendimientos. En este sentido, es indispensable identificar con mayor precisión los mecanismos de adaptación.

La evidencia disponible para México muestra que los impactos del cambio climático en el sector agropecuario son ciertamente diferenciados por regiones e incluso puede considerarse que un aumento ligero de la temperatura puede favorecer las cosechas en algunas áreas. Así, los cambios negativos, reportados en la literatura, se pueden concentrar en el oeste y sur del país y los impactos positivos en el centro y noreste del país (Flores, *et al.*, 1996). Los impactos negativos se concentran en un aumento de la vulnerabilidad sistémica y en la reducción de los rendimientos en los cultivos (Conde *et al.*, 2004). En el largo plazo, el cultivo del maíz en el norte del país se espera que será más difícil a consecuencia de la sequía (Gay *et al.*, 2004); asimismo se perderá, en alguna medida, la capacidad de cosechar maíz en la zona costera del suroeste (Ibarrarán, 2007). Además se proyecta que la superficie apta para este cultivo se reduzca y se observen importantes reducciones en los rendimientos en algunos Estados como Puebla, Veracruz y Jalisco (Conde, *et al.*, 2004). También se pronostica una reducción de entre 73% a 78% en la producción de café en Veracruz (Gay *et al.*, 2004).

Estos impactos climáticos ya se han traducido en diversos procesos de adaptación en la agricultura mexicana tales como cambios en los patrones de siembras retrasando el proceso para garantizar lluvias y cambios en los tipos de cultivos. Estos procesos de adaptación permiten que se “disfracen” los impactos del cambio climático y que se asocie a otros factores distintos a los climáticos. Ello retrasará los impactos climáticos mesurables y deja ver la importancia de la adaptación. No obstante ello, se observa que estos procesos de adaptación resultan insuficientes, ineficientes y no sustentables en el largo plazo.

Asimismo, los impactos del cambio climático sobre el sector agropecuario provienen de un aumento de la variabilidad climática que incide sobre la volatilidad productiva y de ingresos. Este mayor ambiente de riesgo conlleva a un proceso de ajuste en las conductas y comportamientos de los productores agrícolas y pecuarios (Just, 1974). De este modo, la presencia del riesgo hace que los productores agropecuarios tengan comportamientos defensivos como mantener cierta diversificación productiva que no parece óptima desde el punto de la rentabilidad pero que se explica como una diversificación del riesgo.

Así, los cambios negativos, reportados en la literatura, se pueden concentrar en el oeste y sur del país y los impactos positivos en el centro y noreste del país. Estos impactos climáticos ya se han traducido en diversos procesos de adaptación en la agricultura mexicana tales como cambios en los patrones de siembras, cambios en los tipos de cultivos, uso de más agua y construcción de infraestructura. Ello retrasará los impactos climáticos mesurables y deja ver la importancia de la adaptación. No obstante ello, se observa que estos procesos de adaptación resultan insuficientes, ineficientes y no sustentables en el largo plazo en la medida en que ocasiona externalidades negativas adicionales que no son contabilizadas.

### 3. IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO Y LOS MODELOS ECONÓMICOS

Los impactos del cambio climático en el sector agropecuario pueden simularse a través de diversos tipos de modelos tanto econométricos o de equilibrio general computable, mecánicos o experimentales (Doering *et al.*, 2002).

En estos modelos se observa que la producción y los rendimientos de los cultivos dependen de un amplio conjunto de factores, además de los socioeconómicos, tales como las características del suelo (textura, fertilidad, pendiente) y los factores climáticos (lluvia y temperatura).

$$(1) \quad Y_t = F(X_t, K_t, A_t)$$

Donde  $Y_t$  representa al producto,  $X_t$  a los diferentes insumos tales como agua, pesticidas o fertilizantes,  $K_t$  es el capital que incluye el uso de diversas tecnologías, irrigación y la tierra entre otros factores,  $A_t$  representa al medio ambiente e incluye clima y las características del suelo. Desde luego, disponer de todo el conjunto de información que permita combinar los factores económicos y ambientales para los diferentes estados del país resulta particularmente difícil; por ello, en este trabajo se utilizaron modelos que buscan aproximar lo mejor posible esta situación ideal y en todo caso se aplicaron las pruebas econométricas estándar para buscar reducir el problema de incorrecta especificación de las estimaciones. Asimismo, se utilizó una escala espacial que busca eliminar algunos sesgos geográficos. Debe sin embargo mencionarse que las estimaciones presentadas no incluyen explícitamente el impacto del  $CO_2$ .

En este estudio se utilizaron tres modelos para el sector agrícola que permiten identificar los impactos del cambio climático y que corresponden a la información disponible para México. Cada uno de estos modelos permite identificar diferentes impactos y permite analizar diversos aspectos asociados al cambio climático.

1. Un modelo del tipo de función de producción.
2. Un modelo de tipo Ricardiano (Deschenes y Greenstone, 2006).
3. Un modelo de heteroscedasticidad condicional (Engle, 1982) para estimar la volatilidad de las series.

Así, el modelo de función de producción agrícola puede ser expresado (Fleischer *et al.*, 2008) de acuerdo a la ecuación (2). Las variables exógenas pueden incluir al clima, a la cuota de agua de riego y las variables económicas incluyen mano de obra, capital, semilla, fertilizantes y otros insumos. La función de producción se define entonces como:

$$(2) \quad Y_j(z, m, x_j), j = 1, 2, \dots, n \text{ cultivos}$$

Donde  $Y_j$  es la función de producción,  $z$  es el vector de variables climáticas,  $m$  es un vector de características exógenas y  $x_j$  es un vector de insumos del cultivo  $j$ ;  $x_j$  puede ser expresado en el óptimo como  $x_j = x_j(z, m)$ . De acuerdo con Mendelsohn *et al.* (1994) las variables climáticas pueden ser incluidas como una forma funcional cuadrática. Los coeficientes estimados ayudan entonces a predecir los cambios en producción bajo escenarios alternativos de cambio climático y la forma no lineal refleja una trayectoria óptima sobre la producción. Así, un coeficiente positivo para el término lineal y uno negativo para el término cuadrático indica que la temperatura tiene efectos positivos sobre la producción para después, paulatinamente, incidir negativamente (Kaufmann y Snell, 1997).

El modelo de tipo Ricardiano se basa en el supuesto de una relación directa entre el clima y el valor de la tierra agrícola de modo que el valor de la tierra refleja la productividad de la tierra en un lugar específico Mendelsohn, *et al.* (1994). Así, se puede medir la contribución marginal de cada insumo ambiental al ingreso agrícola, ya que se presupone que el valor agrícola refleja el valor presente de la suma de todos los beneficios netos futuros (Molua y Lambi, 2007). En principio, el enfoque Ricardiano corrige el sesgo en la función de producción usando datos económicos sobre el valor de la tierra. El modelo de tipo Ricardiano, al igual que la función de producción, es un modelo no lineal que incluye las variables climáticas de forma lineal y cuadrática.

El comportamiento histórico de los rendimientos agrícolas, del valor de la producción agrícola (reflejado en el PIB agrícola) y de los precios relativos de los cultivos sigue una tendencia positiva pero con una gran volatilidad. Esta volatilidad se asocia a la presencia de un cierto nivel de incertidumbre y de riesgo y que existe además la posibilidad de que se mezclen períodos de alta y baja volatilidad.

Ello sugiere que los agentes económicos ante un aumento de la volatilidad o el riesgo en el sector agropecuario no buscan maximizar sus ganancias sino reducir su riesgo a través de diversos comportamientos defensivos como la diversificación de cultivos y de actividades. Ello desde luego, tiene consecuencias negativas sobre la productividad del sector. Este comportamiento puede ser capturado por el modelo de heteroscedasticidad condicional autorregresiva (ARCH) (Engle, 1982).

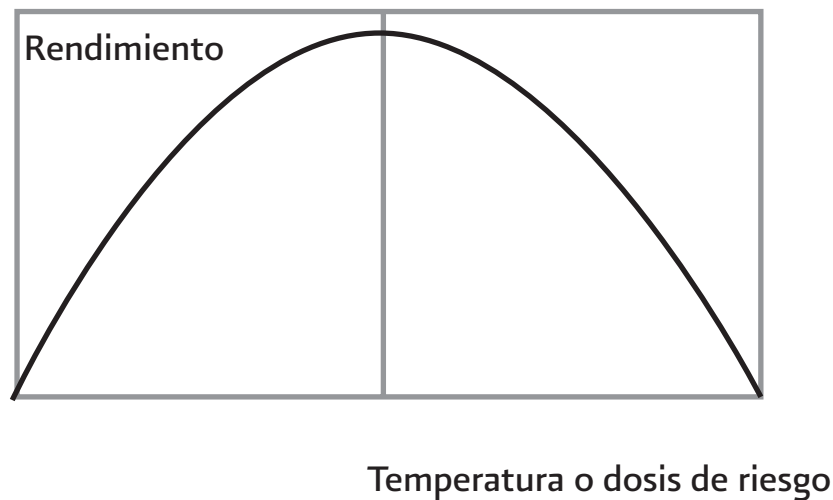
#### 4. PRODUCCIÓN Y RENDIMIENTOS DEL SECTOR AGROPECUARIO CON CAMBIO CLIMÁTICO

Las series de producción agrícolas muestran una tendencia ascendente en el tiempo, que es incluso bastante pronunciada en algunos casos. En este sentido, se utilizó, atendiendo, a la falta de información disponible, una especificación básica que busca capturar el comportamiento tendencial de la serie y el impacto climático correspondiente en torno a esta tendencia de acuerdo a la ecuación (3) (Carlson, Silverman, Miranowski, 1993).

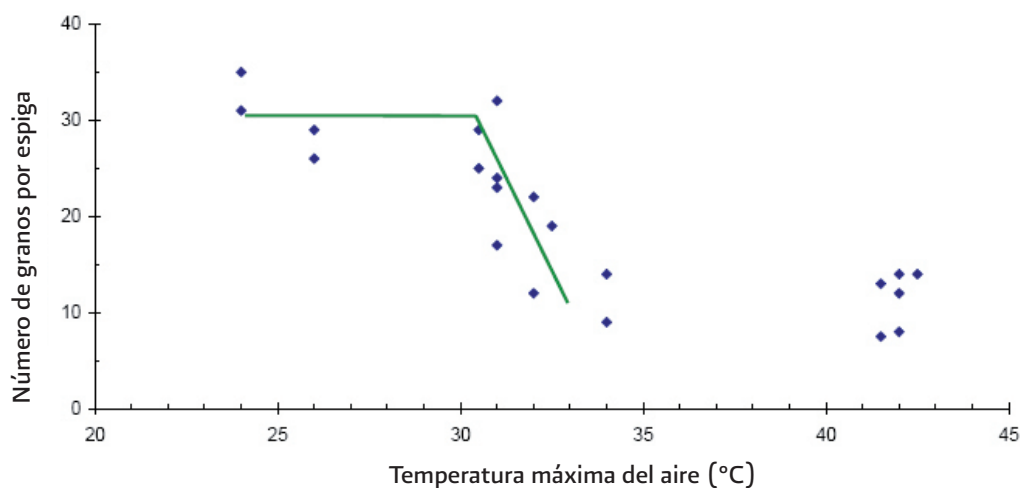
$$(3) \quad YA_t = \alpha_0 + \alpha_1 T + \alpha_2 T^2 + \beta_1 TEM_t + \beta_2 TEM_t^2 + \beta_3 PRE_t + \beta_4 PRE_t^2 + \mu_t$$

En modelo econométrico utilizado captura el impacto lineal del clima. De este modo, es posible identificar la presencia de una relación cóncava entre temperatura y rendimientos (Gráficas 30 y 31) de tal forma que la temperatura estimula inicialmente el crecimiento de las cosechas para, posteriormente, reducirlo; lo mismo que en la precipitación, asociada al riego (Doering *et al.*, 2002).

Gráfica 30. Relación cóncava entre temperatura y rendimientos



**Gráfica 31. Relación cóncava entre temperatura y rendimientos del trigo en el Reino Unido**



Fuente: Wheelerol. et al. (2007)

Los impactos no lineales de la precipitación asociados a la dosis de riego en la producción y los rendimientos agrícolas son consistentes con la evidencia empírica (Cuadro 14) pero debe matizarse atendiendo a la relación entre precipitación y dosis de riego y temperatura y requerimientos de riego. Adams (1989) argumenta que el cambio climático ocasionará una demanda creciente de riego como consecuencia de la evo-transpiración lo que implicará una sobreexplotación de los acuíferos e importantes obras de infraestructura aunque es aun relativamente incierta la relación entre el agua superficial y los acuíferos (Alley, 2001). Asimismo, debe considerarse que el agua es un insumo fijo en la función de producción agrícola difícil de substituir sobre ciertos niveles mínimos (Carlson, et al., 1993, Moore y Dinar, 1995, Moore, 1999 y Dupont y Renzetti, 2001).

### CUADRO 14. RESUMEN DE LAS FUNCIONES DE PRODUCCIÓN INCLUYENDO AL AGUA

Autor	Cultivo	Localización	Año	Función de Rendimiento	R <sup>2</sup>	Precio medio de la cosecha	Valor Máximo del agua (pts/m <sup>3</sup> ) a partir de la productividad media
D'Amato	Patata (Battipaglia)	Piana de Sele (Italia)	1985	$Q=111.88+0.13105 A - 0.000040816 A^2$	0.99	150,000 pts/q	98.28
D'Amato	Patata (Battipaglia)	Piana de Sele (Italia)	1986	$Q=166.627+0.1526 A - 0.00001186 A^2$	0.97	150,000 pts/q	114.45
D'Amato	Patata (Budrio)	Norte de Italia	1985	$Q = 313.37 + 0.22007 A - 0.00003397 A^2$	0.99	150,000 pts/q	165.05
D'Amato	Patata (Budrio)	Norte de Italia	1986	$Q = 448.7909 + 0.239348 A - 0.00007449 A^2$	0.97	150,000 pts/q	179.5
How	Caña de azúcar	Waipio, Oahu (Hawaii)	1966	$Q = - 173.454 + 4.50783 A - 0.0156311 A^2$	0.9727	25,000 pts/q	7.9
Del Amor	Almendro (Garrigues)	Murcia (España)	1984	$Q = 0.0543665 + 0.50204 A - 0.012312 A^2$	0.6965	215 pts/kg	53.94
Del Amor	Almendro (Garrigues)	Murcia (España)	1986	$Q = 1.53243 + 0.179881 A - 0.00189786 A^2$	0.89	215 pts/kg	19.3

## CUADRO 14. RESUMEN DE LAS FUNCIONES DE PRODUCCIÓN INCLUYENDO AL AGUA (CONTINUACIÓN)

Autor	Cultivo	Localización	Año	Función de Rendimiento	R <sup>2</sup>	Precio medio de la cosecha	Valor Máximo del agua (pts/m <sup>3</sup> ) a partir de la productividad media
Del Amor	Almendro (Ramillete)	Murcia (España)	1984	$Q = 0.914199 + 0.251151 A - 0.0052441 A^2$	0.9676	215 pts/kg	26.75
Del Amor	Almendro (Ramillete)	Murcia (España)	1986	$Q = -0.247173 + 0.363454 A - 0.0070699 A^2$	0.5883	215 pts/kg	36.97
Del Amor	Almendro (Atocha)	Murcia (España)	1984	$Q = -0.649558 + 1.45308 A - 0.0382713 A^2$	0.9991	45 pts/kg	31.15
Del Amor	Almendro (Atocha)	Murcia (España)	1985	$Q = 2.90312 + 0.954259 A - 0.015195 A^2$	0.9735	45 pts/kg	21.47

Nota: q = producción, A = dosis de riego. Fuente: Caballer y Guadalajara, 1998.

Los resultados obtenidos para México sobre la producción y los rendimientos agrícolas por producto y para los índices de producción tanto a nivel nacional como estatal y por estaciones del año, así como los resultados para la producción nacional pecuaria<sup>17</sup> muestran que existen impactos significativos y crecientes del cambio climático. Las estimaciones<sup>18</sup> de las ecuaciones de los índices de producción se reportan, como ejemplo, en el Cuadro 15 en donde se incluyó una constante, una tendencia y la tendencia al cuadrado para buscar reducir el problema de especificación tratando de capturar los efectos del progreso técnico y otros factores (Chang, 2002) y reducir el problema de la regresión espúrea (Engle y Granger, 1987) y aplicando el procedimiento de lo general a lo específico. Especificaciones relativamente similares están en Vaux y Pratt, (1983), Boggess *et al.*, (1983), Hexem y Heady, (1978), Ayer y Hoyt, (1981), Sánchez, *et al.*, (1989), Yavon, (1967) y Bernardo *et al.*, (1987) y Caballer y Guadalajara, (1998). Así, estas ecuaciones no rechazan las pruebas de especificación econométricas tradicionales y muestran un buen ajuste y una alta capacidad para simular la trayectoria real reciente (Gráfica 32). Estos modelos tienen además la especificación no lineal para cada variable de clima utilizando el término lineal y cuadrático lo que permite obtener un valor óptimo sobre la producción asociado a la variabilidad climática.

## CUADRO 15. ECUACIONES DEL ÍNDICE DE PRODUCCIÓN AGRÍCOLA

	Índice de producción prim/ver	Índice de producción oto/inv	Índice de producción del año cíclico	Índice de producción perenne
C	-529.59 (-0.17)			-377.32 (-0.06)
T	0.086 -0.11	1.499 -4.85	-0.1517 (-0.3252)	
T <sup>2</sup>	0.0547 -1.89	0.0189 -1.89	0.0769 -4.1335	0.074 -10.53
temp_pv	29.96 -0.145			
(temp_pv) <sup>2</sup>	-0.475 (-0.140)			
temp_oi		5.126 -2.42		

<sup>17</sup> Los resultados de la producción pecuaria deben de tomarse con extrema precaución.

<sup>18</sup> Las especificaciones se obtuvieron considerando el procedimiento de lo general a lo específico y que las series pueden asociarse a un comportamiento tendencial. Similar al de una serie estacionaria con tendencia (TSP) o que en todo caso esta discusión sobrepasa las condiciones de este estudio (Maddala y Kin, 1998).

## CUADRO 15. ECUACIONES DEL ÍNDICE DE PRODUCCIÓN AGRÍCOLA (CONTINUACIÓN)

	Índice de producción prim/ver	Índice de producción oto/inv	Índice de producción del año cíclico	Índice de producción perenne
(temp_oi) <sup>2</sup>		-0.124 (-1.51)		
temp			1.7261 -0.334	5.44 -0.012
temp <sup>2</sup>			-0.029 (-0.2296)	-0.19 (-0.024)
prec_pv	0.33 -1.31			
(prec_pv) <sup>2</sup>	-0.0002 (-1.095)			
prec_oi		0.16 -2.31		
(prec_oi) <sup>2</sup>		-0.00049 (-3.12)		
prec			0.0857 -0.5796	1.054 -5.57
prec <sup>2</sup>			-0.00003 -0.4804	-0.0006 (-5.92)
D82		6.82 -2.56		
D83				27.1 -4.44
D88	-16.388 (-2.17)		-7.0336 (-1.6538)	
D89		-6.2 (-2.27)		
D92				15.175 -2.083
D95		-6.099 (-2.31)		
D05			-17.2381 (-3.5016)	
D06			-12.1264 (-2.2467)	
R <sup>2</sup>	0.79	0.98	0.94	0.94
<b>Pruebas de especificación</b>				
Jarque-Bera	0.448 (0.799)	0.0079(0.99)	0.933 (0.63)	6.66 (0.035)
LM	1.05 (0.319)	0.218(0.64)	0.389 (0.54)	0.005 (0.94)
ARCH	0.044 (0.834)	1.019 (0.32)	1.249 (0.27)	0.741 (0.39)
Dickey-Fuller (ADF)	-4.03 (0.02)	-5.31 (0.001)	-5.52 (0.00)	-4.99 (0.002)

Similar al de una serie estacionaria con tendencia (TSP) o que en todo caso esta discusión sobrepasa las condiciones de este estudio ( Maddala y Kin, 1998).

### Índice de Producción Agrícola

La construcción del índice se realizó de acuerdo al concepto del índice de Laspeyres. Así, se toma el volumen de la producción y el precio de cada uno de los productos, utilizando como año base el 2002,  $q_0^i$  es la cantidad del año base del producto  $i$  y  $p_0^i$  es el precio del año base del producto  $i$ . De este modo, se obtiene el valor de producción corriente ( $q_1^i * p_1^i$ ) para todos los productos y se hace la suma para cada año ( $\sum q_1^i * p_1^i$ ). Luego se obtiene el valor de la producción con el precio de los productos del año base ( $q_1^i * p_0^i$ ) y se hace la suma de dicho valor para todos los años. Después se obtiene el valor de la producción de los productos con los precios corriente pero multiplicado con la producción del año base ( $q_0^i * p_1^i$ ) y se suma para cada año ( $\sum q_0^i * p_1^i$ ). Y por último se obtiene el valor de la producción del año base ( $\sum q_0^i * p_0^i$ ). Finalmente el índice se obtiene de la siguiente manera:

$$iq = \frac{\left( \frac{\sum q_1^i * p_1^i}{\sum q_1^i * p_0^i} \right)}{\left( \frac{\sum q_0^i * p_1^i}{\sum q_0^i * p_0^i} \right)}$$

En el estudio se construyeron cuatro índices nacionales uno para el ciclo primavera-verano, para el ciclo otoño-invierno, para los cultivos cíclicos y para los cultivos perennes. Los cuatro índices de producción están contruidos para el total de la superficie cosechada: temporal y riego. Se tomaron los cultivos que representan más del 90% del valor de la producción total de los productos cíclicos y los productos de cultivo perennes. En total fueron 30 cultivos para los productos cíclicos entre los que se encuentra el maíz grano y forrajero, arroz, frijol, sorgo grano y forrajero, soya, trigo grano, cebolla, chile verde, papa, tabaco, tomate rojo y verde, fresa, melón, sandía, etc. Y para el índice de producción de cultivos perennes se tomaron 20 cultivos entre los que se encuentra la caña de azúcar, café cereza, aguacate, naranja, limón y mango.

### Series no estacionarias: DSP y TSP

De acuerdo al estadístico Dickey- Fuller (DF) para la prueba de raíz unitaria, un modelo tipo AR(1) con tendencia determinística se especifica de la siguiente forma:

$$y_t = \alpha_1 + \mu T + \phi y_{t-1} + e_t$$

Donde la hipótesis nula es  $H_0: \phi = 1$ , por lo que la serie sigue un camino aleatorio. Mientras la hipótesis alternativa es  $H_1: \phi \neq 1$  o  $\phi < 1$ , así que la serie es estacionaria.

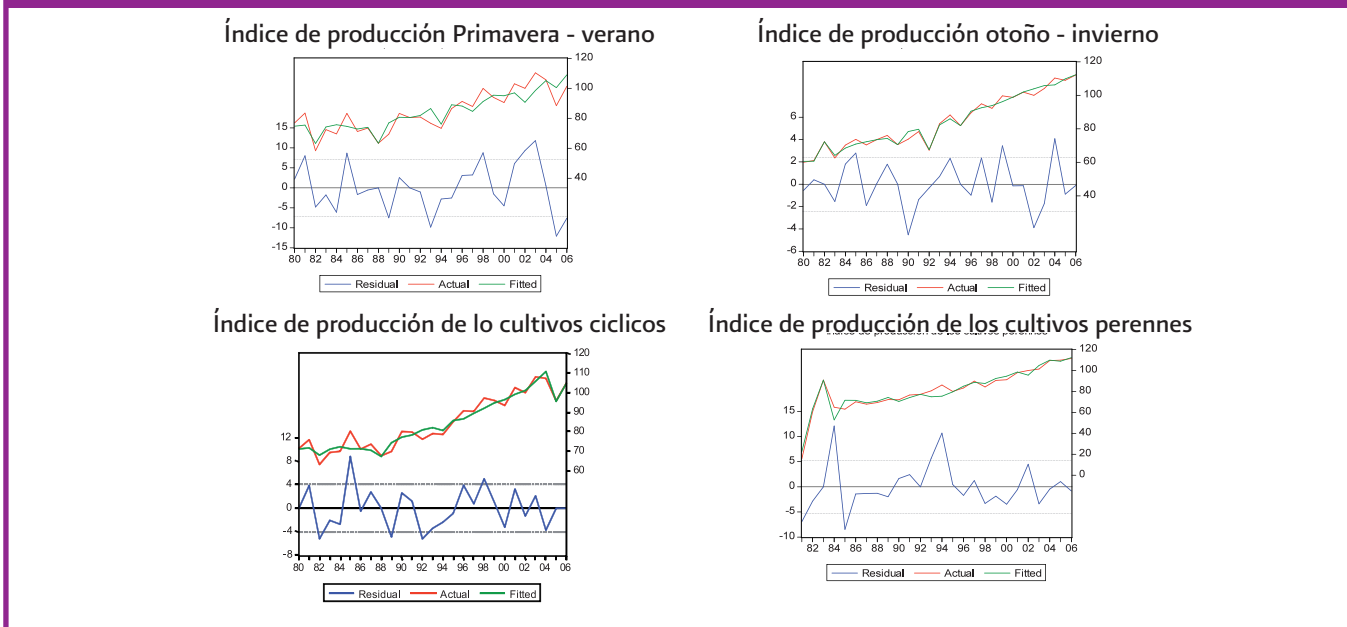
Si  $\alpha_1 \neq 0$ ,  $|\phi| < 1$  y  $\mu \neq 0$ , entonces la serie tiene una tendencia determinística con un componente AR(1) estacionario (DSP, *Difference stationary process*). Por tanto la serie tiene un orden de integración I(0).

Si  $\alpha_1 \neq 0$ ,  $|\phi| < 1$  y  $\mu = 0$ , la serie es estacionaria alrededor de una constante (DSP, *Difference stationary process*). Por lo que la serie tiene un orden de integración I(0).

Y si  $\alpha_1 \neq 0$ ,  $|\phi| = 0$  y  $\mu \neq 0$ , tendencia determinística estacionaria (TSP, *Trend Stationary Process*). Por tanto la serie tiene un orden de integración I(0).



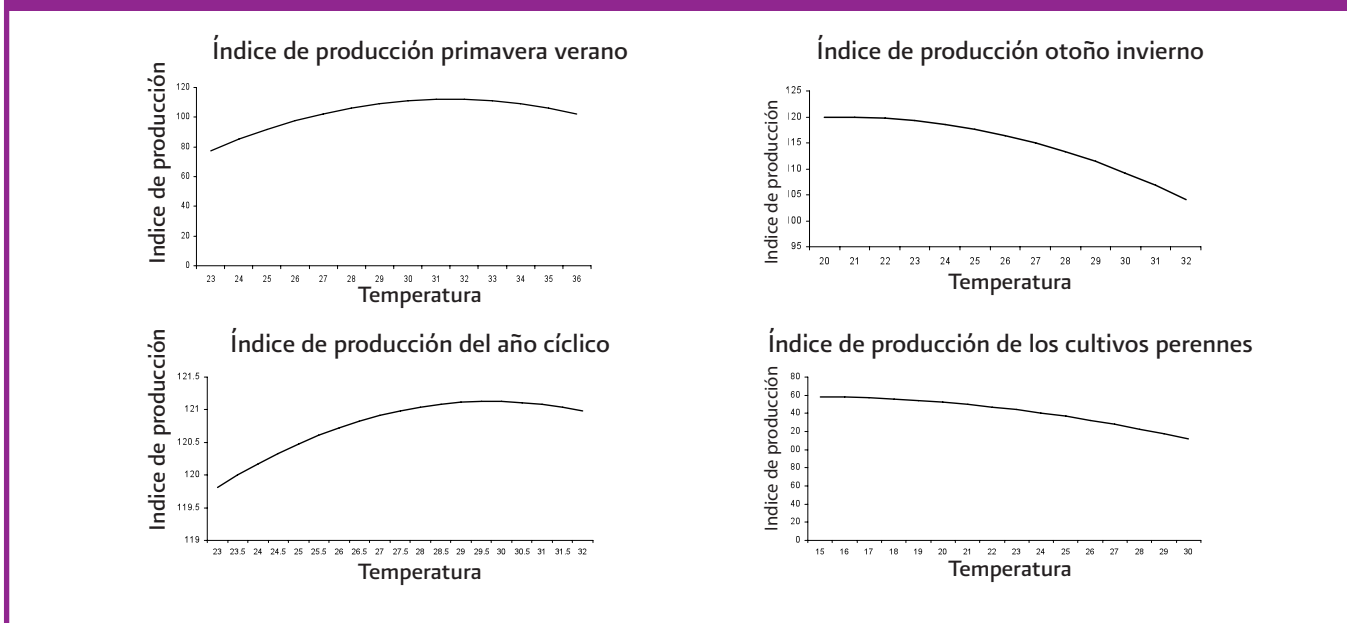
**Gráfica 32. Valores reales proyectados y residuales de los modelos de índices de producción agrícola, 1980 a 2006**



El conjunto de estas estimaciones permiten hacer varias inferencias sobre los impactos del cambio climático en la producción agrícola:

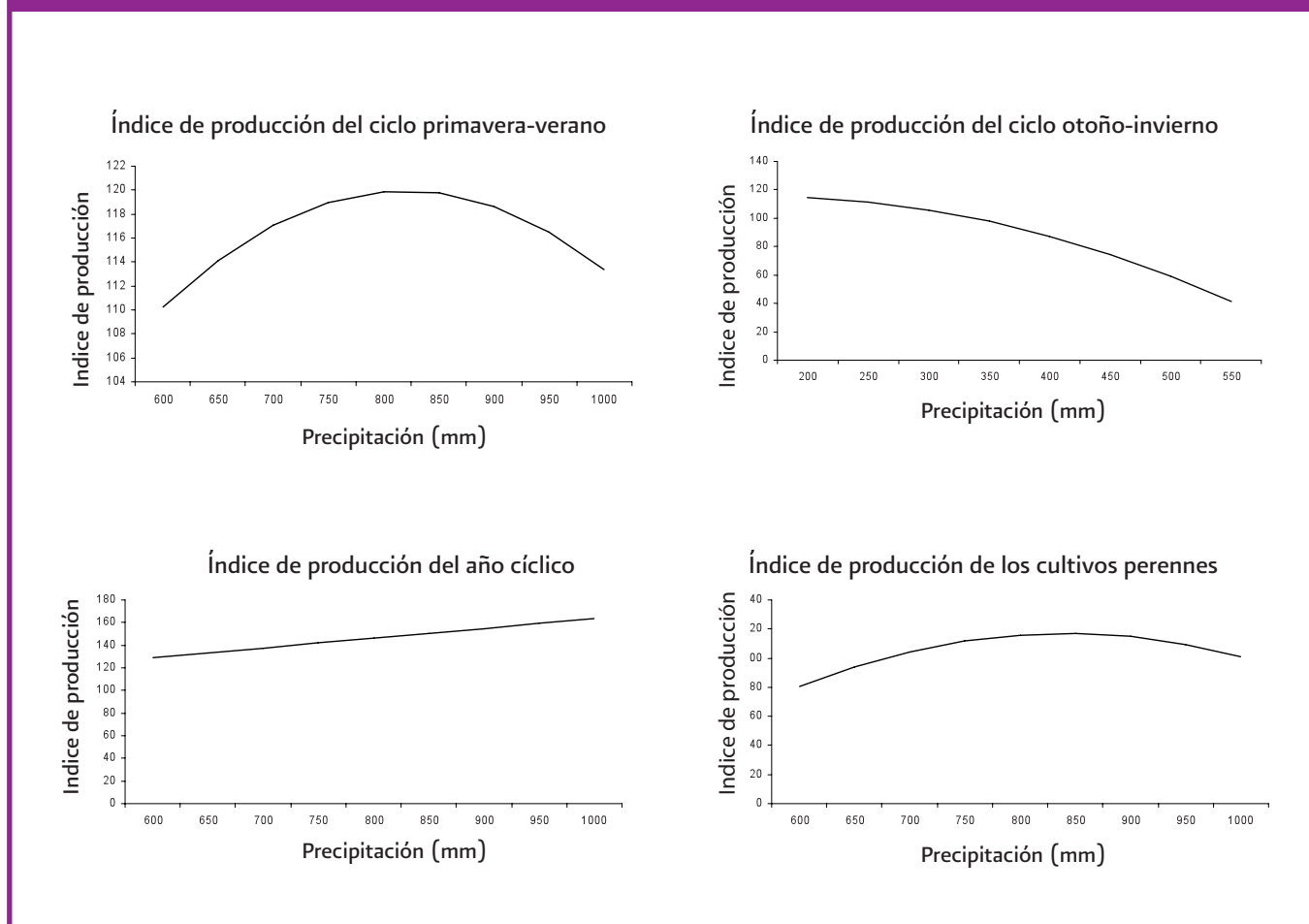
1. Cada ciclo productivo tiene diferentes niveles óptimos de temperatura y es mayor para los productos cíclicos que para los perennes (Gráfica 33).

**Gráfica 33. Función del índice de producción para distintos niveles de temperatura**



2. En precipitación<sup>19</sup> se observan también diferencias por ciclo. Esto es, en el ciclo primavera-verano los requerimientos de lluvia para alcanzar el máximo de producción son mayores que en el ciclo otoño-invierno. De igual forma se tiene que el requerimiento de precipitación para los cultivos cíclicos es mayor que para los cultivos perennes (Gráfica 34). Los valores en precipitación deben ponderarse con precaución ya que aun responden a la disponibilidad total de agua.

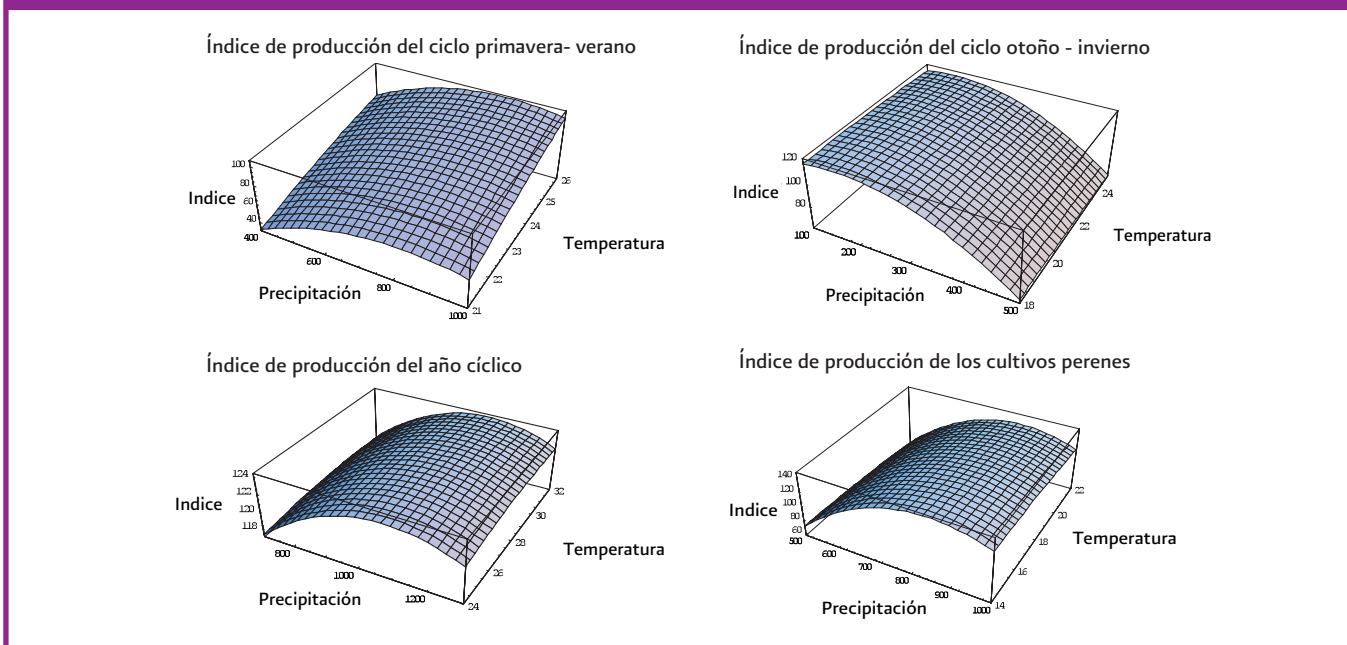
**Gráfica 34. Función del índice de producción para distintos niveles de precipitación**



3. El análisis conjunto del efecto de la temperatura máxima promedio y la precipitación muestra que, dentro de ciertos rangos, es posible compensar el aumento de temperatura con una mayor cantidad de agua (Gráfica 35). Ello sin embargo no es sustentable en el largo plazo y plantea además problemas en el uso del agua al generar externalidades negativas adicionales.

<sup>19</sup> Desde luego, es necesario considerar que la precipitación es sólo un componente de la disponibilidad de agua.

**Gráfica 35. Efecto de la temperatura y la precipitación sobre la producción agrícola**



4. La maximización de las funciones de producción indica que determinados cultivos se verán beneficiados por el aumento de la temperatura o por mayores precipitaciones. De este modo, es posible que en algunas regiones del país con temperaturas bajas se observen aun ganancias asociadas al cambio climático. Además, debe destacarse que existe un importante proceso de adaptación en curso en la medida en que aun se observan aumentos significativos en la producción de algunos cultivos.
5. El análisis por cultivo de los rendimientos del maíz, frijol, trigo, sorgo, soya y sandía y para los seis cultivos cíclicos<sup>20</sup>, a nivel nacional, se muestran en los Cuadros 16 y 17. Además para los seis cultivos fueron estimadas funciones sin incluir un aumento de la temperatura pero con la tendencia actual, la constante en algunos casos, la precipitación y los requerimientos de agua por hectárea<sup>21</sup> con objeto de verificar la posible presencia de sesgos por el tipo de especificación. (Gráfica 36).

## CUADRO 16. ECUACIONES DEL RENDIMIENTO DEL MAÍZ, FRIJOL Y TRIGO

	Rendimiento del maíz (con temp)	Rendimiento del maíz (sin temp)	Rendimiento del frijol (con temp)	Rendimiento del frijol (sin temp)	Rendimiento del trigo (con temp)	Rendimiento del trigo (sin temp)
C		0.014 (0.0008)	-89.18 (-1.53)	-6.706 (-0.67)		
T	-120.927 (-1.13)		-0.033 (-2.25)	-0.0156 (-1.04)	0.032 (0.52)	0.049 (4.78)

<sup>20</sup> Se sumaron los índices de primavera verano y otoño-invierno.

<sup>21</sup> Todas las ecuaciones de los cultivos no rechazan las pruebas de especificación con excepción de la sandía que tiene autocorrelación y muestran que simulan razonablemente el comportamiento histórico de los datos (Gráfica 36). Algunas de las variables no son significativas, aunque con la inclusión de los términos cuadráticos existe el problema de colinealidad por lo que el nivel de significancia de los coeficientes es poco confiable; no obstante todas las variables climáticas tienen el signo esperado. Algunas ecuaciones no incluyen la precipitación con el término lineal y el término cuadrático pero en cambio tienen la desviación de la precipitación respecto a su media que captura el efecto de un evento extremo sobre los rendimientos, por lo que el coeficiente esperado es negativo. Todas las especificaciones incluyen una variable de tecnología referida a los requerimientos de agua por hectárea (agua), que en algunos casos incluye además del término lineal y también el cuadrático lo que permite obtener un óptimo de rendimientos para un cierto nivel de agua requerida.

## CUADRO 16. ECUACIONES DEL RENDIMIENTO DEL MAÍZ, FRIJOL Y TRIGO (CONTINUACIÓN)

	Rendimiento del maíz (con temp)	Rendimiento del maíz (sin temp)	Rendimiento del frijol (con temp)	Rendimiento del frijol (sin temp)	Rendimiento del trigo (con temp)	Rendimiento del trigo (sin temp)
T <sup>2</sup>	0.00649 (11.90)	0.0063 (19.2)	0.00067 (1.24)	0.00067 (1.25)	0.0015 (0.79)	
Temp	8.675 (1.12)		4.77 (1.15)		0.487 (1.44)	
temp <sup>2</sup>	- 0.1559 (-1.12)		- 0.0792 (-1.06)		- 0.0135 (-1.14)	
Prec	0.0048 (0.57)	0.0035 (0.35)	0.0022 (0.48)	0.0023 (0.42)		0.0088 (2.86)
prec <sup>2</sup>	- 0.0000017 (-0.366)	-0.0000011 (-0.19)	- 0.0000007 (-0.28)	- 0.000001 (-0.40)		- 0.0000054 (-2.95)
Δprec					- 0.0018 (-1.34)	0.00023 (1.79)
Agua	0.000122 (1.23)	0.00025 (0.078)	0.0033 (2.17)	0.0012 (0.73)	0.00027 (1.67)	
(agua) <sup>2</sup>		- 0.00000009 (0.060)	-0.0000001 (2.06)	- 0.00000005 (-0.64)		
D85				- 0.289 (-1.99)		
D89	- 0.5319 (-2.23)		- 0.206 (-1.83)			
D93	0.9436 (3.53)	1.11 (3.28)				
D94	0.8858 (3.33)	0.898 (2.84)				
D95						0.61 (-1.80)
D99	- 0.73601 (3.03)					
D02			0.739 (4.25)	0.599 (2.95)		
D06						0.75 (2.03)
<b>Pruebas de especificación</b>						
Jarque-Bera	2.89 (0.23)	0.698 (0.70)	0.08 (0.96)	0.69 (0.71)	0.97 (0.61)	0.72 (0.69)
LM	0.13 (0.72)	0.21 (0.65)	1.14 (0.30)	1.14 (0.30)	0.39 (0.54)	0.12 (0.73)
ARCH	0.007 (0.93)	1.26 (0.27)	0.26 (0.61)	3.87 (0.06)	0.12 (0.73)	1.05 (0.32)
ADF	-4.72 (0.005)	-4.36 (0.009)	-4.27 (0.01)	-3.86 (0.03)	-5.11 (0.001)	-5.16 (0.001)

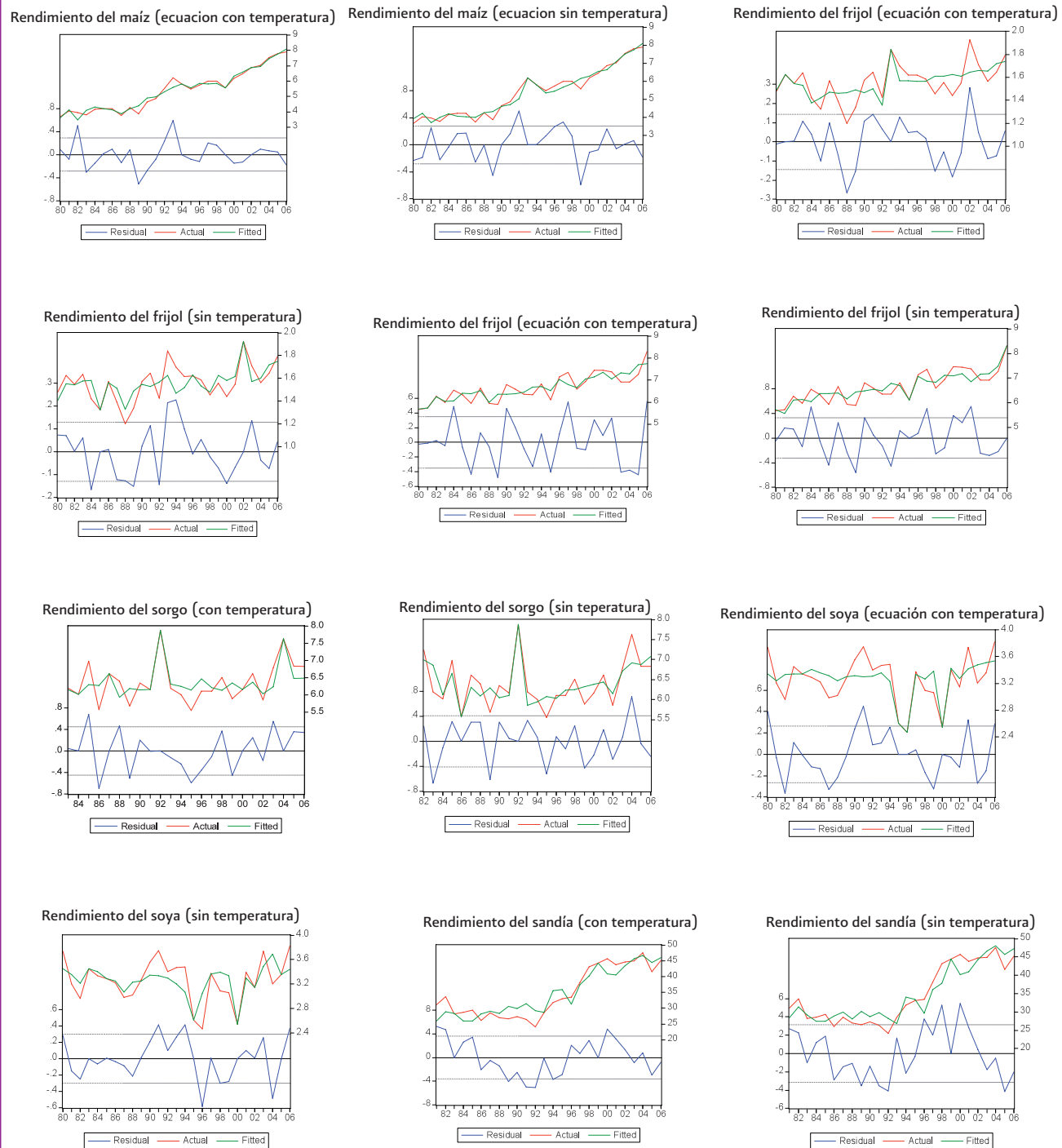
## CUADRO 17. ECUACIONES DEL RENDIMIENTO DEL SORGO, SOYA, Y SANDÍA

	Rendimiento del sorgo (con temp)	Rendimiento del sorgo (sin temp)	Rendimiento de la soya (con temp)	Rendimiento de la soya (sin temp)	Rendimiento de la sandía (con temp)	Rendimiento del trigo (sin temp)
C	-250.72 (-0.94)	-31.557 (-1.11)		-22.99 (-1.17)	-309.14 (-0.27)	-307.29 (-1.48)
T	- 0.228 (-2.99)	- 0.199 (-3.64)	-0.035 (-1.1)	- 0.041 (-1.25)		0.765 (-2.17)
T <sup>2</sup>	0.0089 (3.29)	0.007 (3.79)	0.0014 (1.2)	0.002 (1.67)	0.043 (7.01)	- 0.0602 (4.78)
Temp	16.86 (0.86)		0.189 (0.75)		20.348 (0.23)	

## CUADRO 17. ECUACIONES DEL RENDIMIENTO DEL SORGO, SOYA, Y SANDÍA (CONTINUACIÓN)

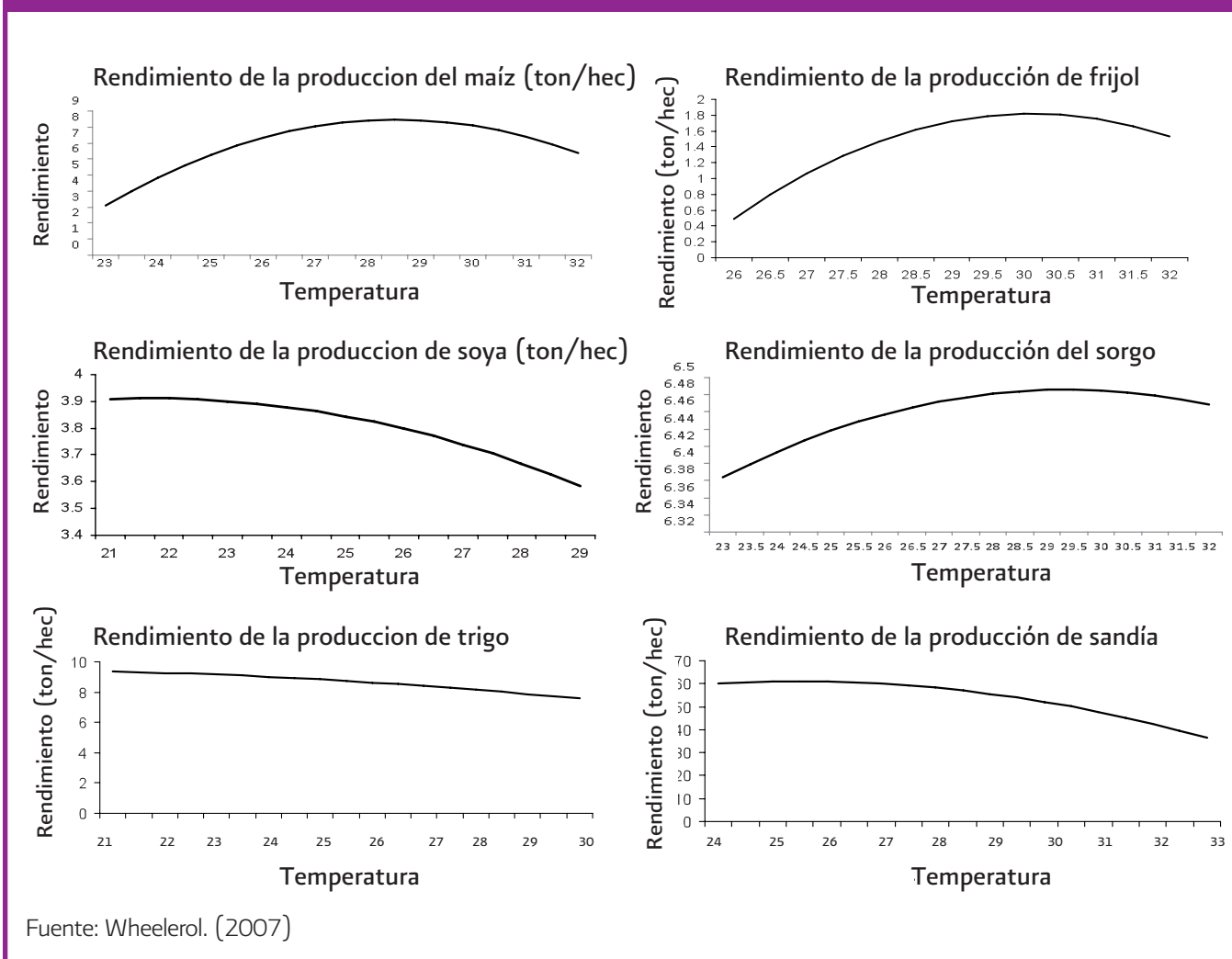
	Rendimiento del sorgo (con temp)	Rendimiento del sorgo (sin temp)	Rendimiento de la soya (con temp)	Rendimiento de la soya (sin temp)	Rendimiento de la sandía (con temp)	Rendimiento del trigo (sin temp)
temp <sup>2</sup>	- 0.31 (-0.87)		- 0.0037 (-0.45)		- 0.468 (-0.30)	
Prec	0.031 (0.95)	0.042 (1.49)		0.015 (1.33)		
prec <sup>2</sup>	- 0.000018 (-0.96)	- 0.000024 (-1.52)		- 0.000007 (-1.26)		
Δprec			-0.000002 (-0.39)		- 0.024 (-2.51)	- 0.011 (-1.31)
Agua	0.0022 (0.40)	0.004 (0.79)	0.0001 (0.81)	0.0038 (1.08)	0.026 (0.76)	0.067 (1.70)
(agua) <sup>2</sup>	0.0000001 (-0.38)	- 0.0000002 (-0.79)		- 0.00000018 (-1.09)	-0.000001 (-0.80)	-0.000003 (-1.77)
D86	- 0.947 (-1.88)	- 0.99 (-2.23)		- 0.289 (-1.99)	- 4.52 (-1.63)	
D89			- 0.206 (-1.83)			
D92	2.349 (3.73)	2.46 (4.11)			- 6.47 (-2.21)	
D95				- 0.78 (-2.39)		
D96			- 0.88 (-2.63)			
D98					8.08 (2.75)	
D99					6.88 (2.56)	7.99 (2.39)
D00			- 0.796 (-2.53)	- 0.78 (-2.44)	4.49 (1.65)	
<b>Pruebas de especificación</b>						
Jarque-Bera	0.43 (0.81)	0.39 (0.82)	0.85 (0.65)	0.48 (0.78)	0.71 (0.70)	1.09 (0.58)
LM	1.07 (0.32)	1.09 (0.31)	1.01 (0.33)	0.63 (0.44)	5.54 (0.03)	5.09 (0.04)
ARCH	0.10 (0.75)	1.94 (0.18)	0.58 (0.45)	1.42 (0.24)	1.08 (0.31)	1.64 (0.21)
ADF	-5.61 (0.001)	-5.78 (0.00)	-2.68 (0.25)	-3.98 (0.02)	-2.67 (0.25)	-5.36 (0.00)

**Gráfica 36. Valores reales y proyectados de los modelos de índices de producción agrícola, 1980 a 2006**



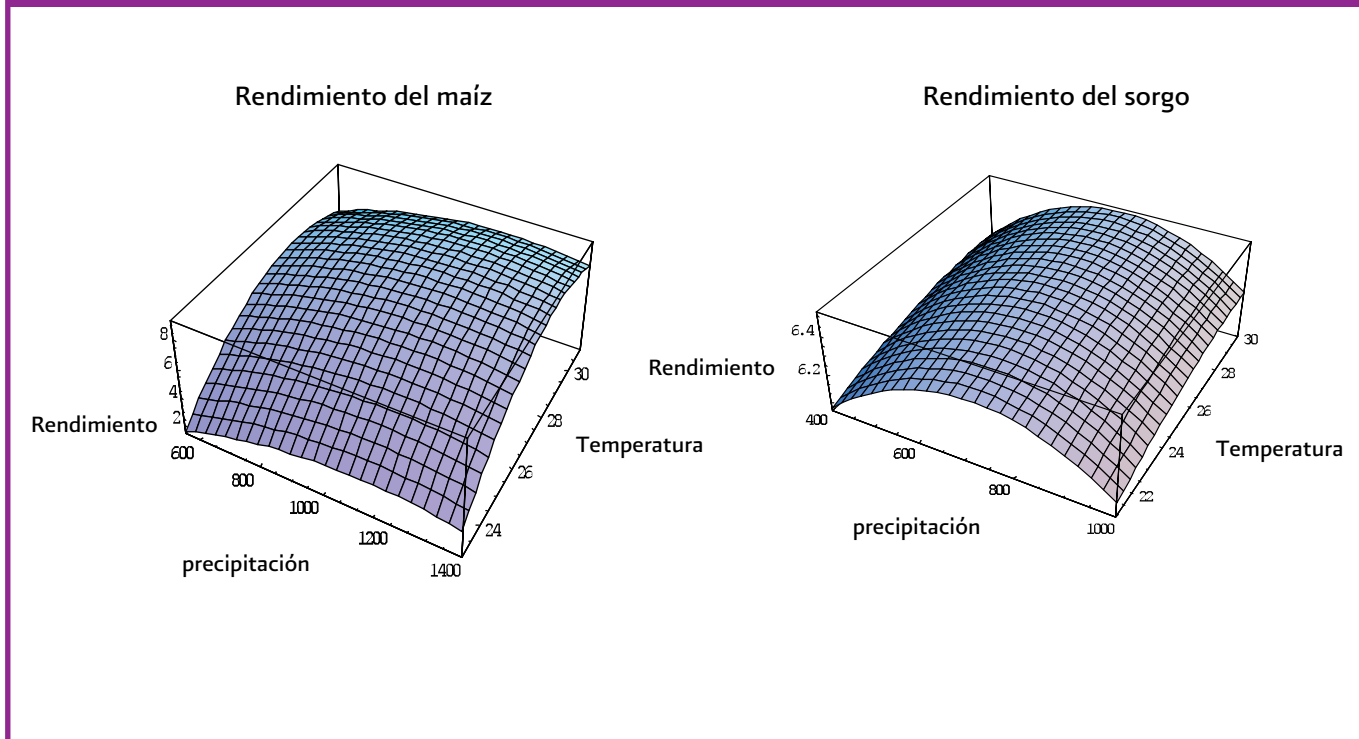
5.1. El análisis de optimización de los rendimientos para distintos rangos de temperatura (Gráfica 37) ilustra que cada cultivo requiere de distintas temperaturas para alcanzar el máximo rendimiento. Por ejemplo el maíz, frijol y sorgo necesitan una mayor temperatura para alcanzar el máximo rendimiento que el trigo y la soya. Asimismo, los cultivos de soya, trigo y sandía ya enfrentan una temperatura promedio nacional que compromete sus niveles de rendimientos (Gráfica 37) mientras que el maíz, sorgo y frijol se están acercando a sus temperaturas óptimas. Estas respuestas climáticas diferenciadas permiten entonces identificar a los productos que puedan utilizarse para diversificar la producción y reducir el riesgo climático. Ello sugiere entonces la ruta posible de los procesos de adaptación individuales.

Gráfica 37. Función rendimientos por cultivos para distintos niveles de temperatura

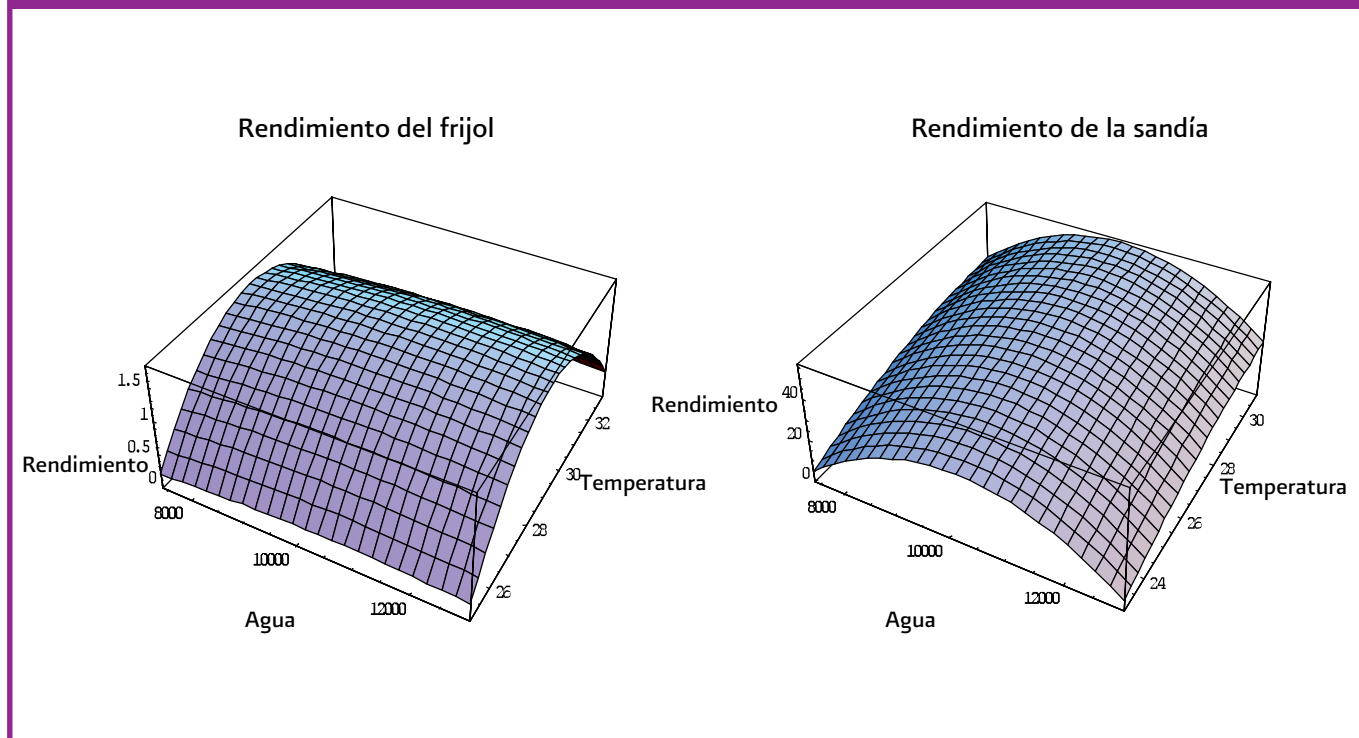


5.2. Los rendimientos de los cultivos para distintos niveles de precipitación permiten identificar que el maíz y el frijol son menos sensibles después de alcanzar el óptimo ante aumentos en la precipitación, sin embargo el trigo, sorgo y la soya presentan una mayor caída para precipitaciones mayores. Asimismo, los valores óptimos en rendimientos para maíz y sorgo con temperatura y precipitación indican que existe aún algún margen de sustitución climática (Gráficas 38 y 39).

Gráfica 38. Efecto de la temperatura y la precipitación sobre cultivos.



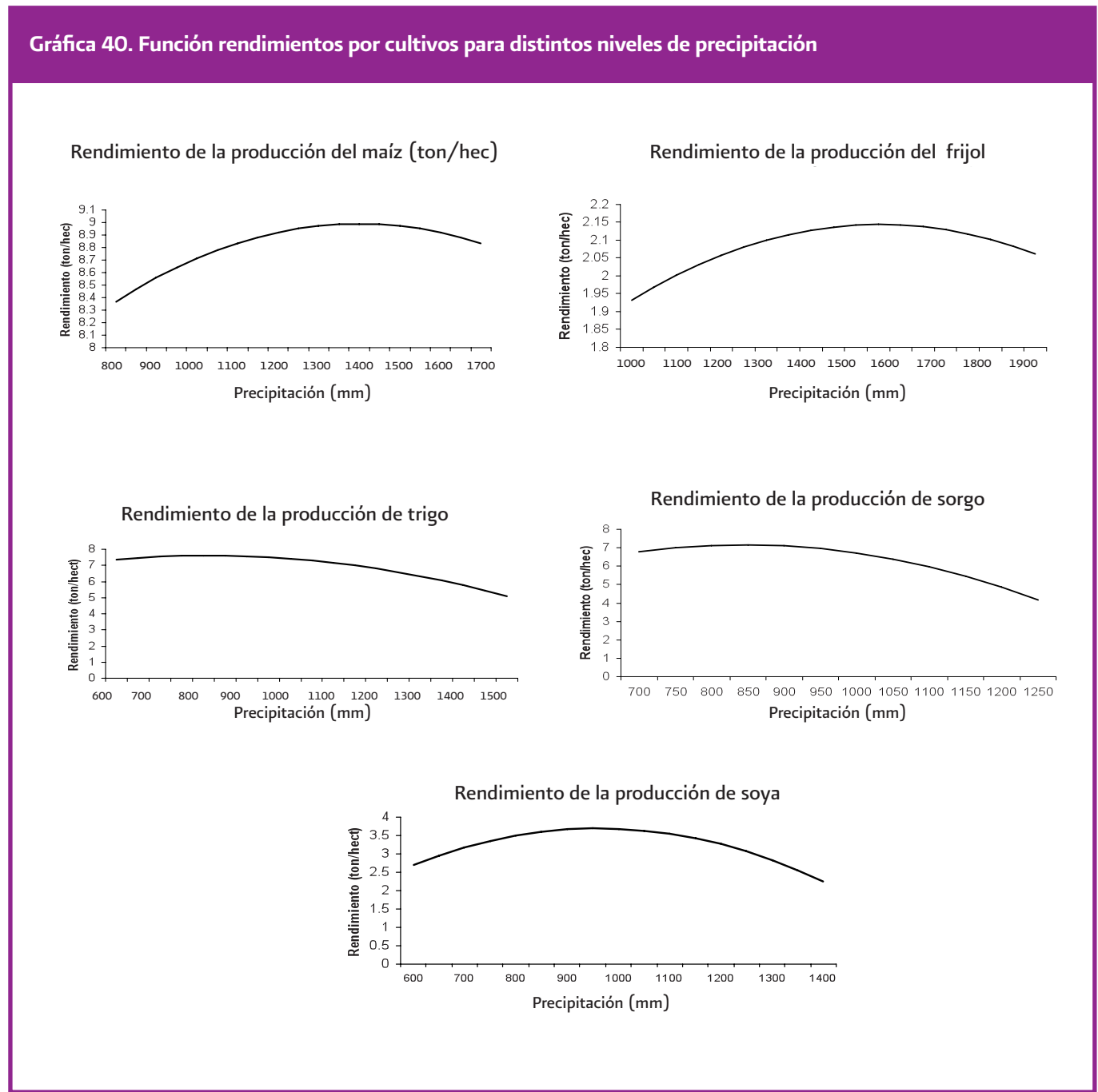
Gráfica 39. Efecto de la temperatura y los requerimientos de agua sobre los cultivos





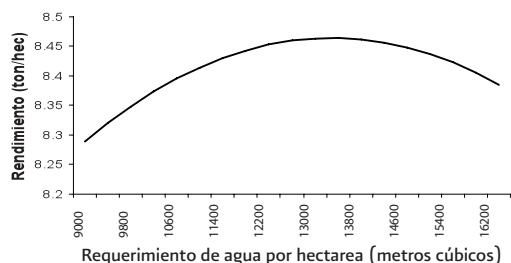
5.3. Los rendimientos para distintas dosis de requerimientos de agua y precipitación por hectárea, obtenidas de los modelos de rendimientos, sin aumento de temperatura, se presentan sólo como modelos indicativos (De Mastro, 1993) (Gráficas 40 y 41). Estos modelos permiten inferir que el sorgo, la soya y la sandía son los más sensibles a cambios en la disponibilidad de agua y que el maíz y el frijol muestran un beneficio mayor por aumentos en los requerimientos de agua antes de obtener el máximo rendimiento. Así, a pesar de que los rendimientos de la sandía son mayores con la temperatura se observa también que es el cultivo que requiere mejores sistemas de riego lo que sugiere limitantes importantes para su producción.

**Gráfica 40. Función rendimientos por cultivos para distintos niveles de precipitación**

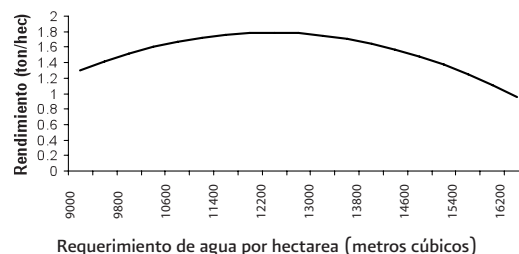


**Gráfica 41. Función rendimientos por cultivos para distintas dosis de agua por hectárea**

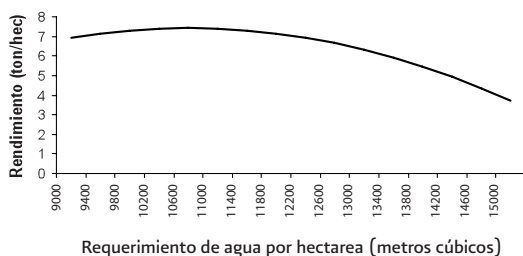
**Rendimientos de la producción de maíz (ton/hec)**



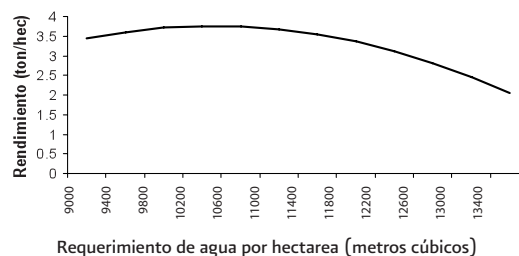
**Rendimiento de la producción del frijol**



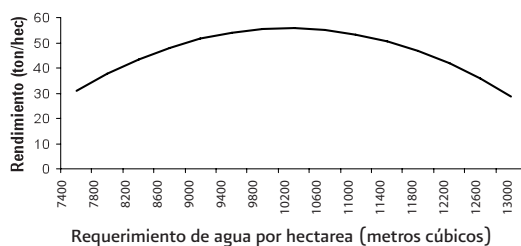
**Rendimientos de la producción del sorgo**



**Rendimiento de la producción de soya**

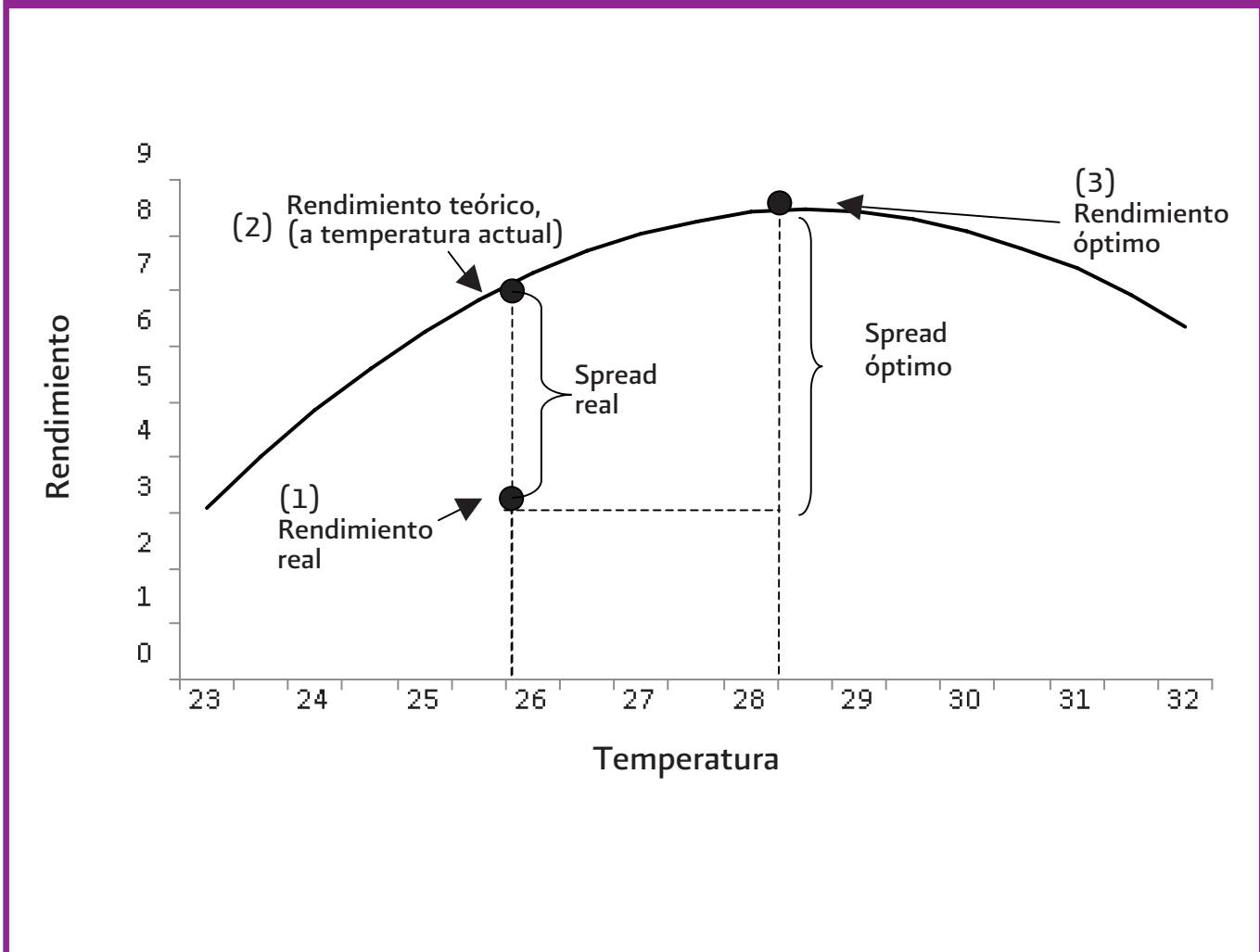


**Rendimiento de la producción de la sandía**



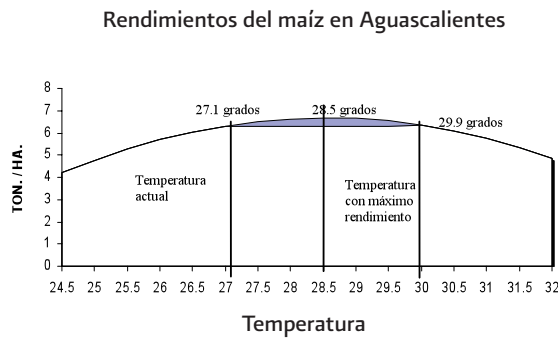
6. El análisis de las estimaciones de los rendimientos por Estado para cada uno de los cultivos se realizó de acuerdo al comportamiento teórico potencial y el real del cultivo y sus diferenciales respectivos (Gráfica 42). Así, se presentan el diferencial (spread) real entre el rendimiento real y el rendimiento que debería tener de acuerdo a su ecuación teórica que es un indicador del proceso de adaptación y el diferencial (spread) óptimo que es el rendimiento real menos el rendimiento óptimo. Así, las Gráficas 43 a la 54 muestran el comportamiento de los rendimientos estatales para diferentes niveles de temperatura.

Gráfica 42. Descripción de la relación rendimiento real, teórico y óptimo en la producción de cultivos

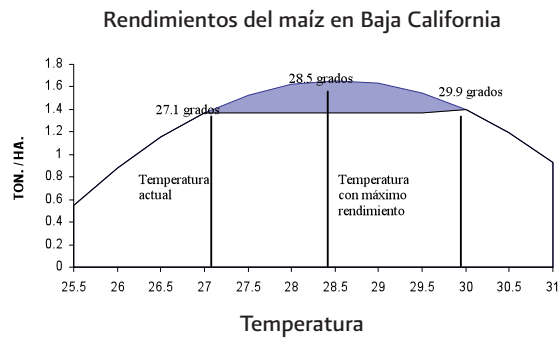


- 6.1. Así, se observa que los rendimientos del maíz, frijol, sorgo y la sandía aun no están en riesgo inmediato en varios Estados ya que aun no se alcanza la temperatura que otorga el rendimiento óptimo. Por ejemplo, en la Gráfica 43 se observan algunos Estados que pueden verse beneficiados con el aumento de la temperatura. Esta ganancia esta representada con la mitad del área marcada, es decir, habrá beneficios en los rendimientos hasta que la temperatura del Estado llegue al área que corresponde al beneficio óptimo. Después de esa temperatura el cambio climático traerá pérdidas en los rendimientos que aumentarán exponencialmente.
- 6.2. Para el maíz se observa (Gráfica 43) que los Estados con temperatura menor a la óptima son, en general, más productivos que los Estados con temperatura mayor a la temperatura óptima con excepción de Baja California y el Distrito Federal. También se observa que, atendiendo a su baja temperatura, los Estados con mayor potencial para beneficiarse por el cambio climático en el cultivo del maíz son el Estado de México, Hidalgo, Puebla y Tlaxcala.
- 6.3. Los Estados en mayor riesgo son aquellos donde los aumentos en temperatura resultarán en menores rendimientos teóricos del cultivo (Gráfica 44). Sin embargo Estados como Sinaloa, Jalisco y Michoacán han evitado los impactos climáticos a través de una mayor inversión en infraestructura por lo que a pesar de que tienen temperaturas altas mantienen altos niveles de rendimientos.

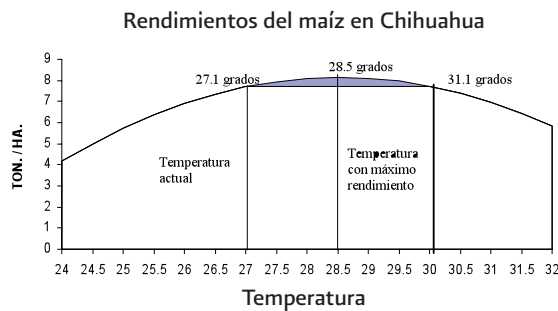
**Gráfica 43. Rendimientos teóricos del maíz en los Estados con temperaturas actuales menores a la temperatura óptima (con ganancias potenciales teóricos por el aumento de temperaturas)**



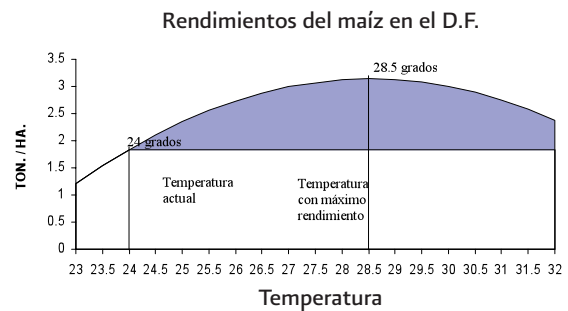
■ Ganancia de rendimiento y pérdida de rendimiento del maíz por el aumento de temperatura



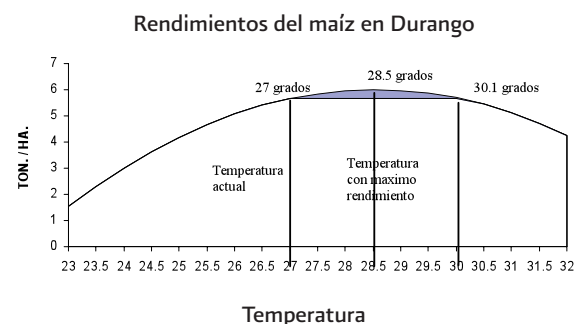
■ Ganancia de rendimiento y pérdida de rendimiento del maíz por el aumento de temperatura



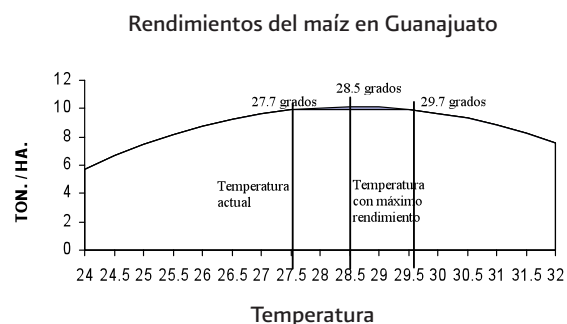
■ Pérdida de rendimiento del maíz bajo las mismas condiciones



■ Pérdida de rendimiento del maíz bajo las mismas condiciones

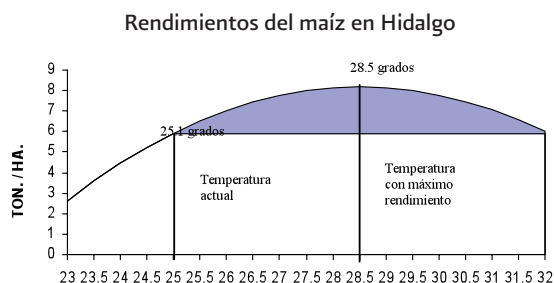


■ Ganancia de rendimiento y pérdida de rendimiento del maíz por el aumento de temperatura

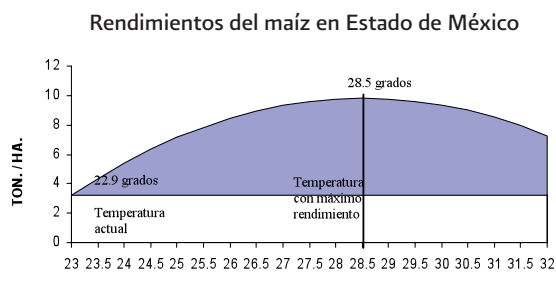


■ Ganancia de rendimiento y pérdida de rendimiento del maíz por el aumento de temperatura

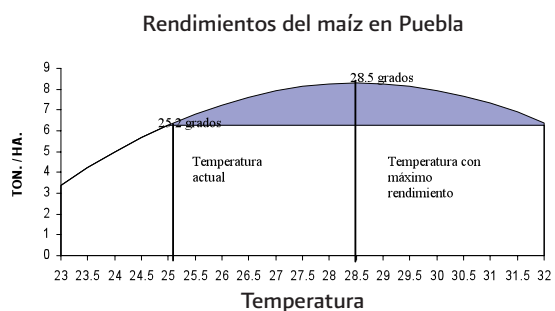
**Gráfica 43. Rendimientos teóricos del maíz en los Estados con temperaturas actuales menores a la temperatura óptima (con ganancias potenciales teóricos por el aumento de temperaturas) (Final)**



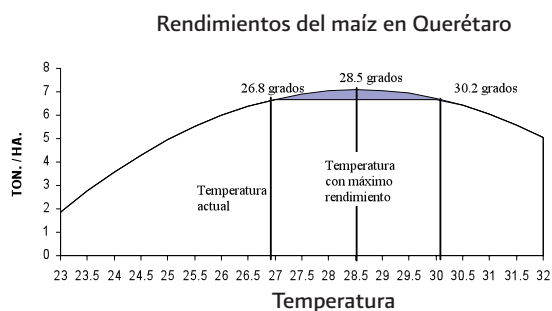
■ Ganancia de rendimiento y pérdida de rendimiento del maíz por el aumento de temperatura



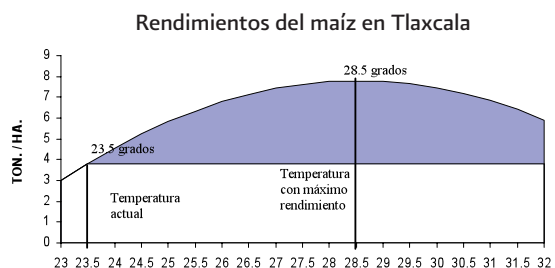
■ Ganancia de rendimiento y pérdida de rendimiento del maíz por el aumento de temperatura



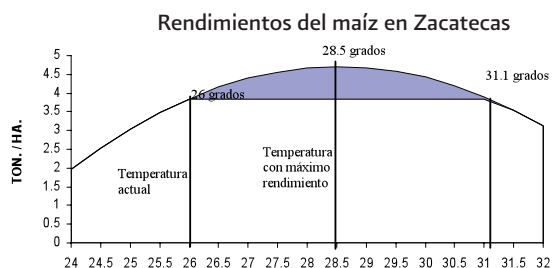
■ Ganancia de rendimiento y pérdida de rendimiento del maíz por el aumento de temperatura



■ Ganancia de rendimiento y pérdida de rendimiento del maíz por el aumento de temperatura

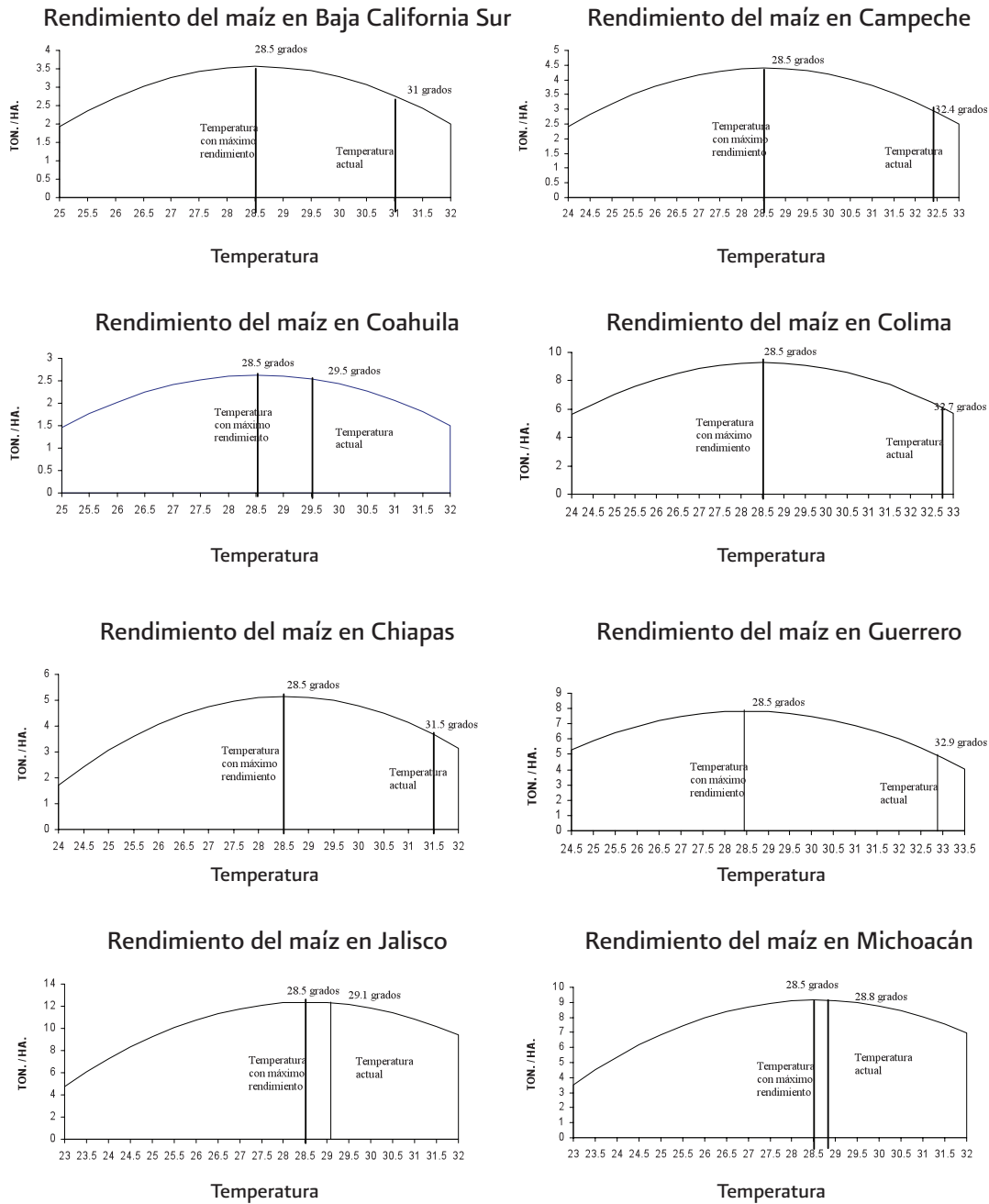


■ Ganancia de rendimiento y pérdida de rendimiento del maíz por el aumento de temperatura

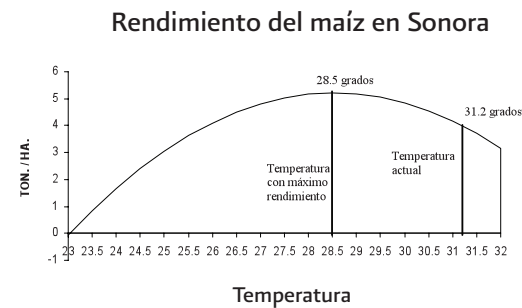
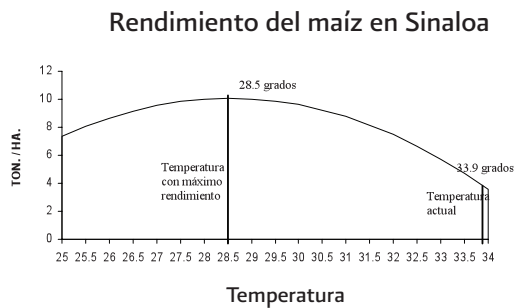
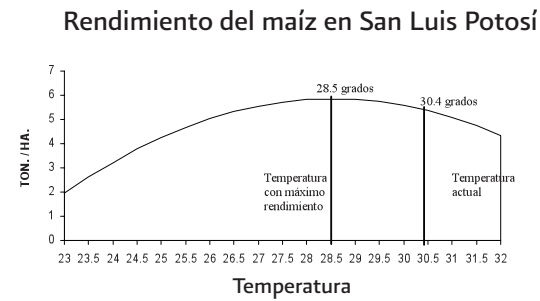
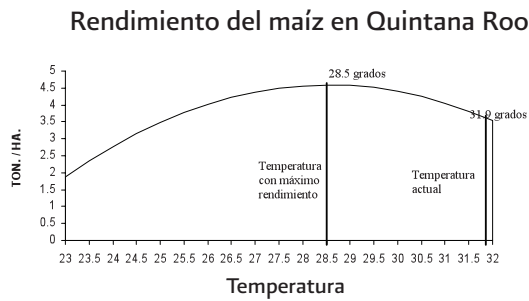
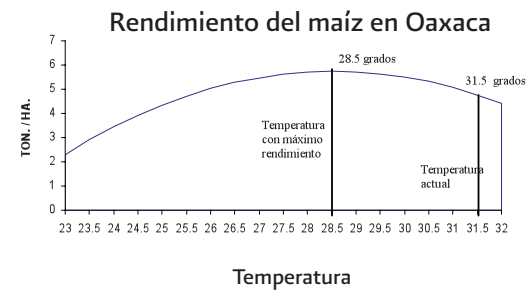
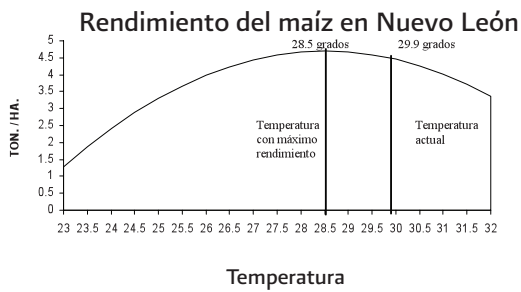
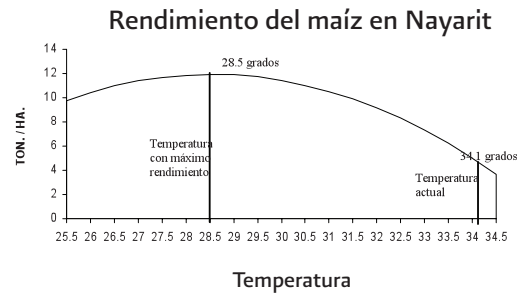
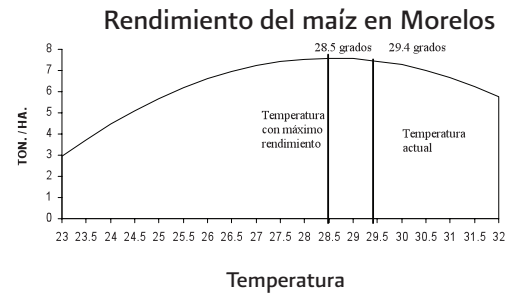


■ Ganancia de rendimiento y pérdida de rendimiento del maíz por el aumento de temperatura

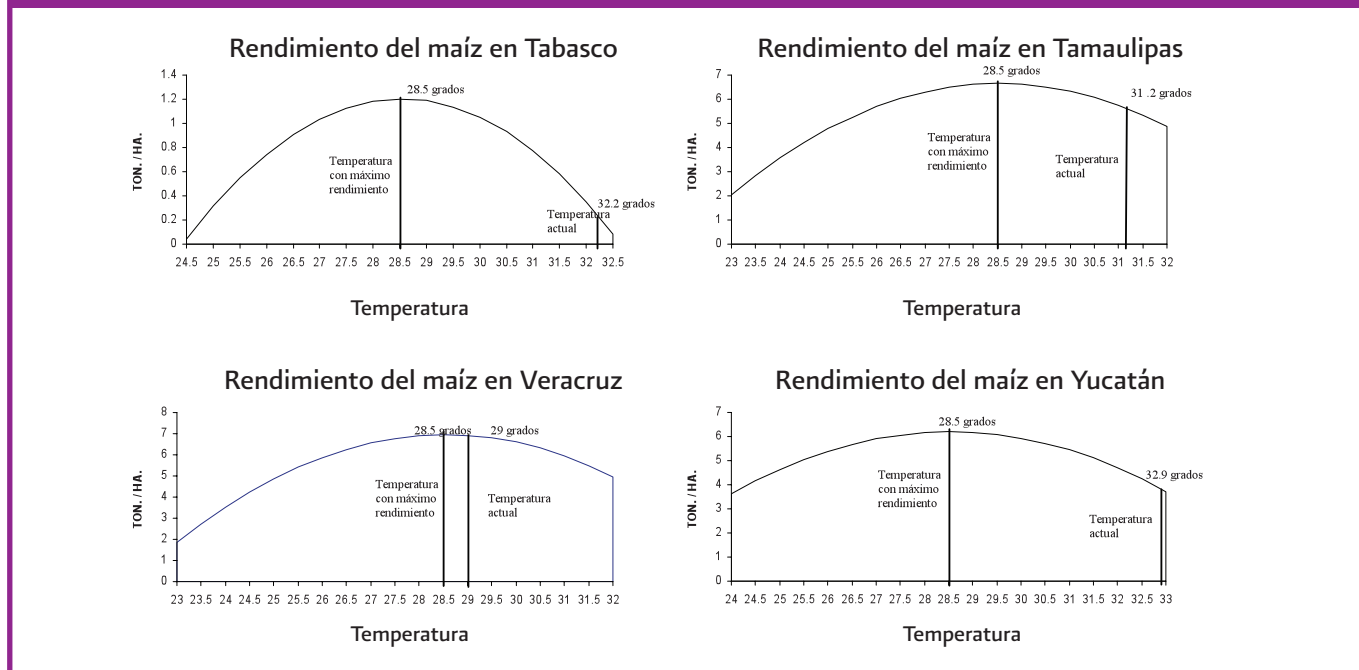
**Gráfica 44. Rendimientos teóricos del maíz en los Estados con temperaturas actuales mayores a la temperatura óptima (con pérdidas potenciales teóricas por el aumento de temperatura)**



**Gráfica 44. Rendimientos teóricos del maíz en los Estados con temperaturas actuales mayores a la temperatura óptima (con pérdidas potenciales teóricas por el aumento de temperatura) (Continuación)**



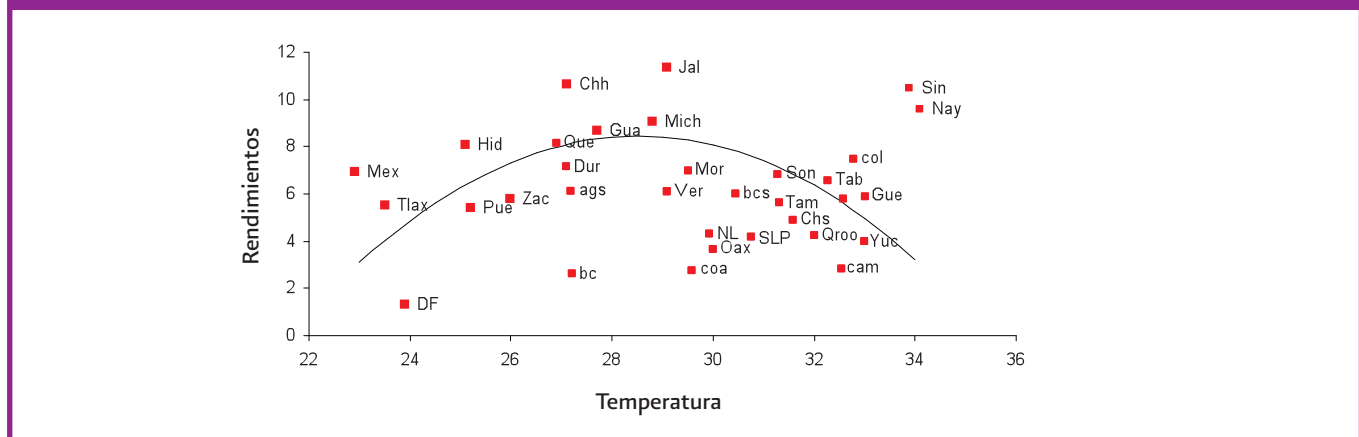
**Gráfica 44. Rendimientos teóricos del maíz en los Estados con temperaturas actuales mayores a la temperatura óptima (con pérdidas potenciales teóricas por el aumento de temperatura) (Final)**



6.4. La Gráfica 45 muestra el rendimiento teórico, con la temperatura del 2006 para cada Estado mientras que la Gráfica 46 muestra los rendimientos del maíz por Estado. Estas gráficas indican que existe un comportamiento real similar al teórico en la mayoría de los Estados lo que confirma la forma teórica de la curva de rendimientos de los cultivos agrícolas y sugiere la presencia de costos crecientes como consecuencia de un aumento en la temperatura; ello con excepción de Sinaloa y Nayarit que tienen altas temperaturas y altos rendimientos debido a su mejor infraestructura y tecnología de riego. Ello muestra la importancia de los procesos de adaptación.

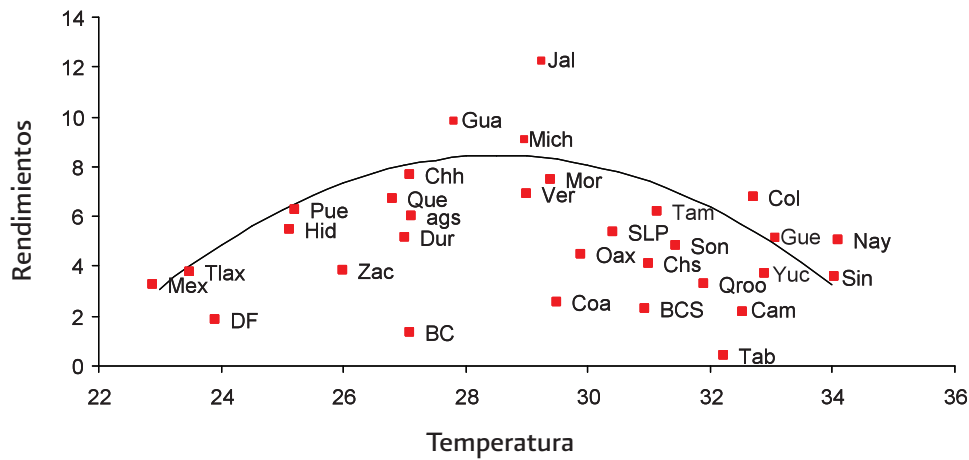
Destaca además que el coeficiente de correlación entre los rendimientos reales y teóricos de 0.64 sugiere que los rendimientos teóricos del maíz son un indicador aceptable del comportamiento de los rendimientos reales.

**Gráfica 45. Rendimiento observado en 2006 del maíz**



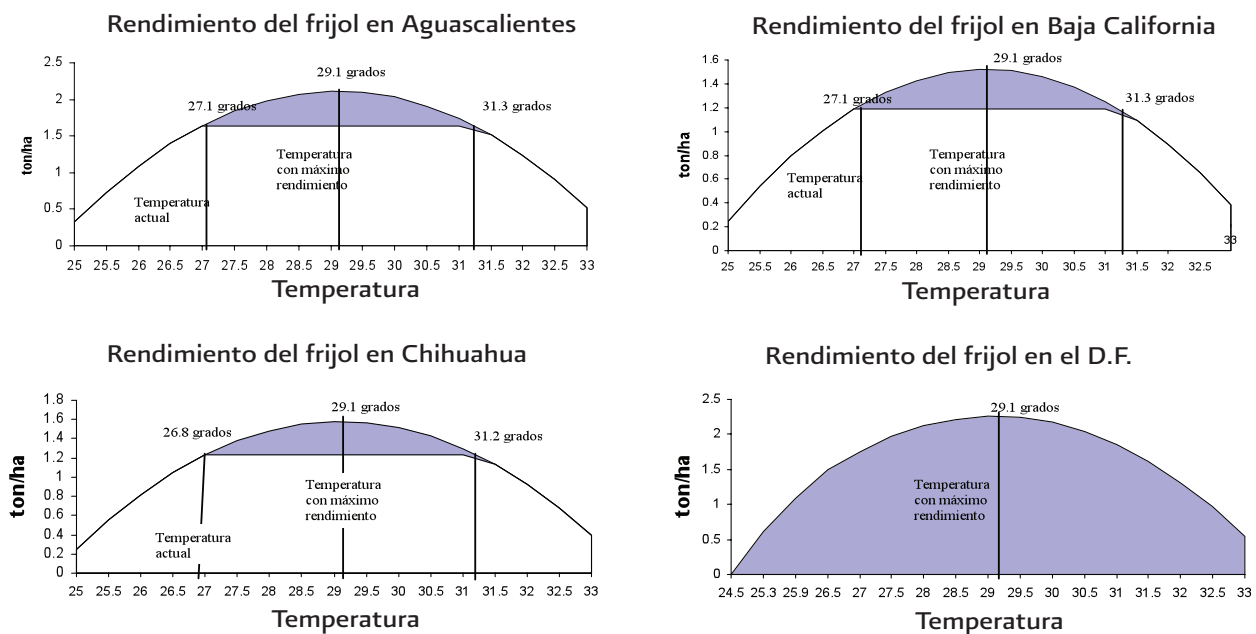


**Gráfica 46. Rendimiento teórico del maíz con la temperatura actual de cada estado**

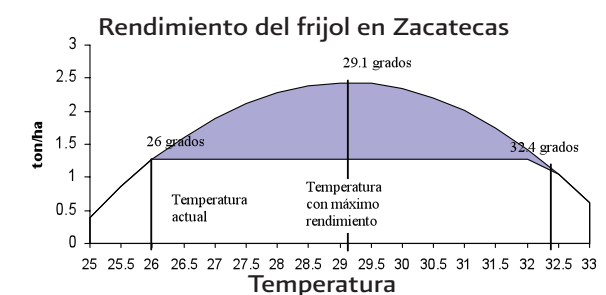
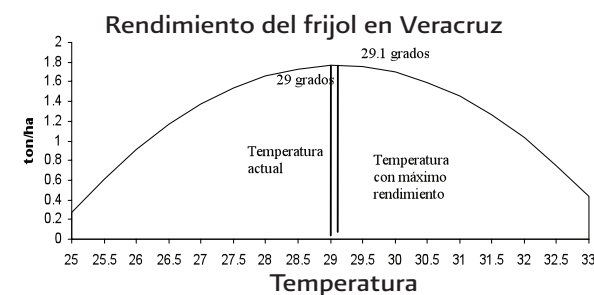
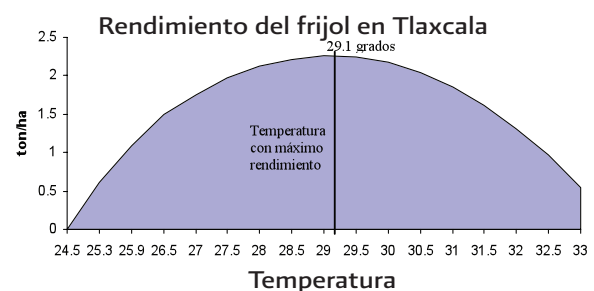
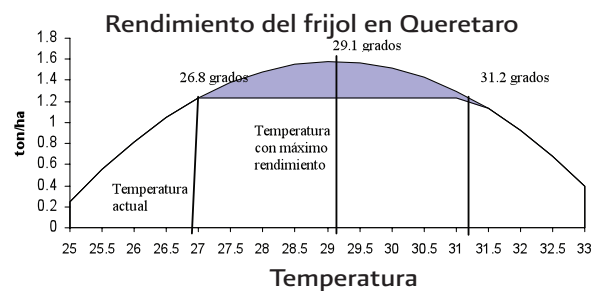
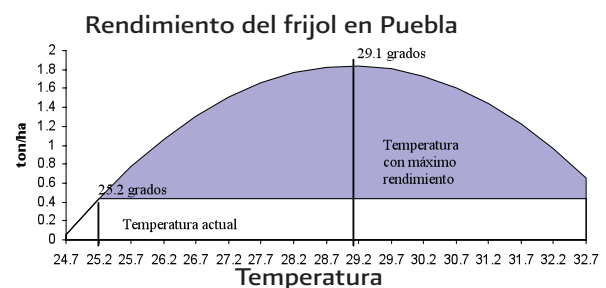
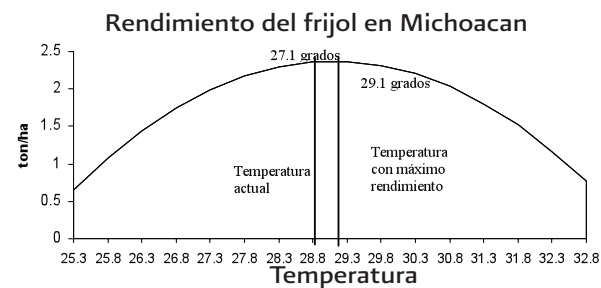
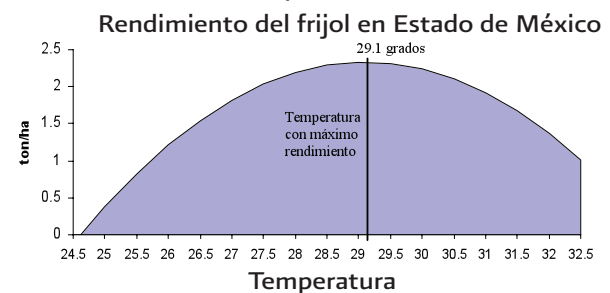
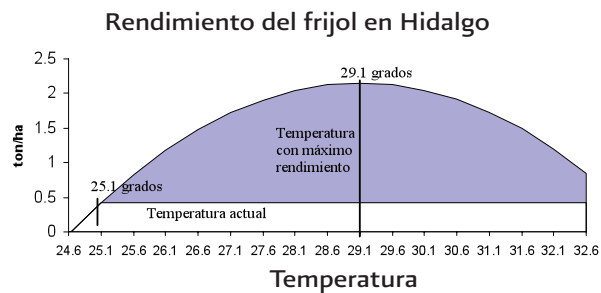
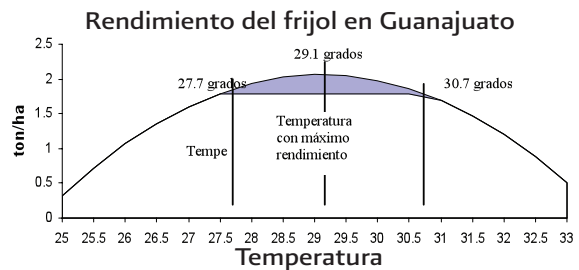
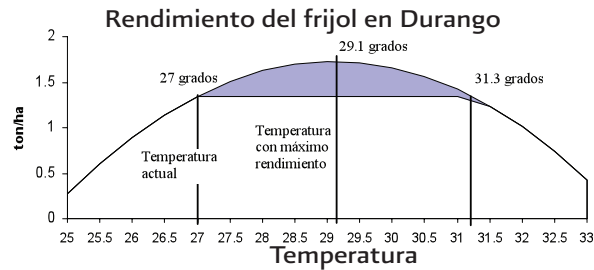


6.5. Los Estados con aumentos esperados en los rendimientos teóricos del frijol se presentan en la Gráfica 47 mientras que aquellos que presentan riesgos potenciales se incluyen en la Gráfica 48. Destaca además que existen Estados que han superado sus rendimientos óptimos esperados Morelos, Nuevo León, San Luis Potosí, Sinaloa, Tamaulipas, entre otros. Ello sugiere la presencia de procesos de adaptación ya en curso.

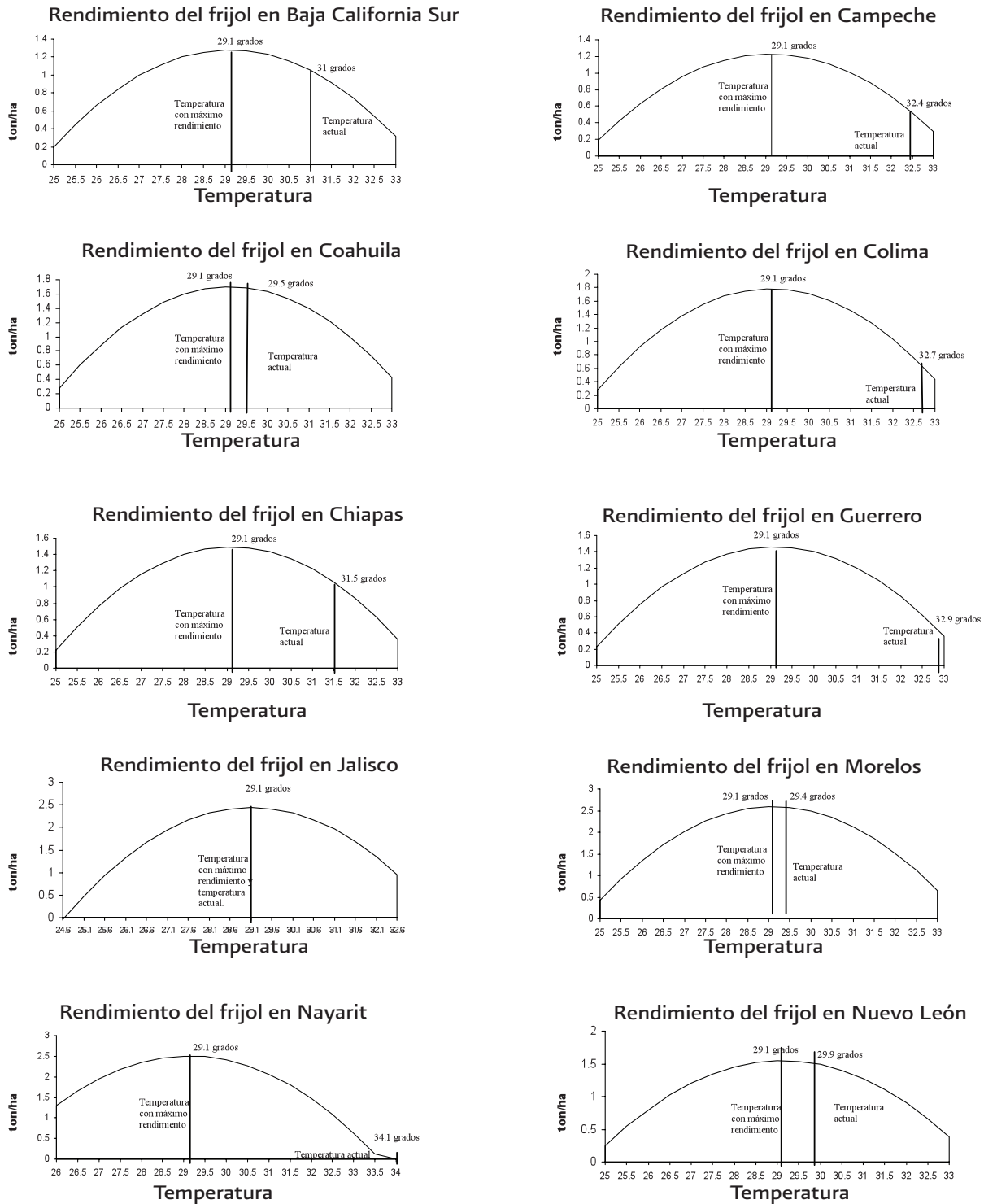
**Gráfica 47. Rendimientos teóricos del frijol en los Estados con temperaturas actuales menores a la temperatura óptima (con ganancias potenciales teóricas por el aumento de temperatura)**



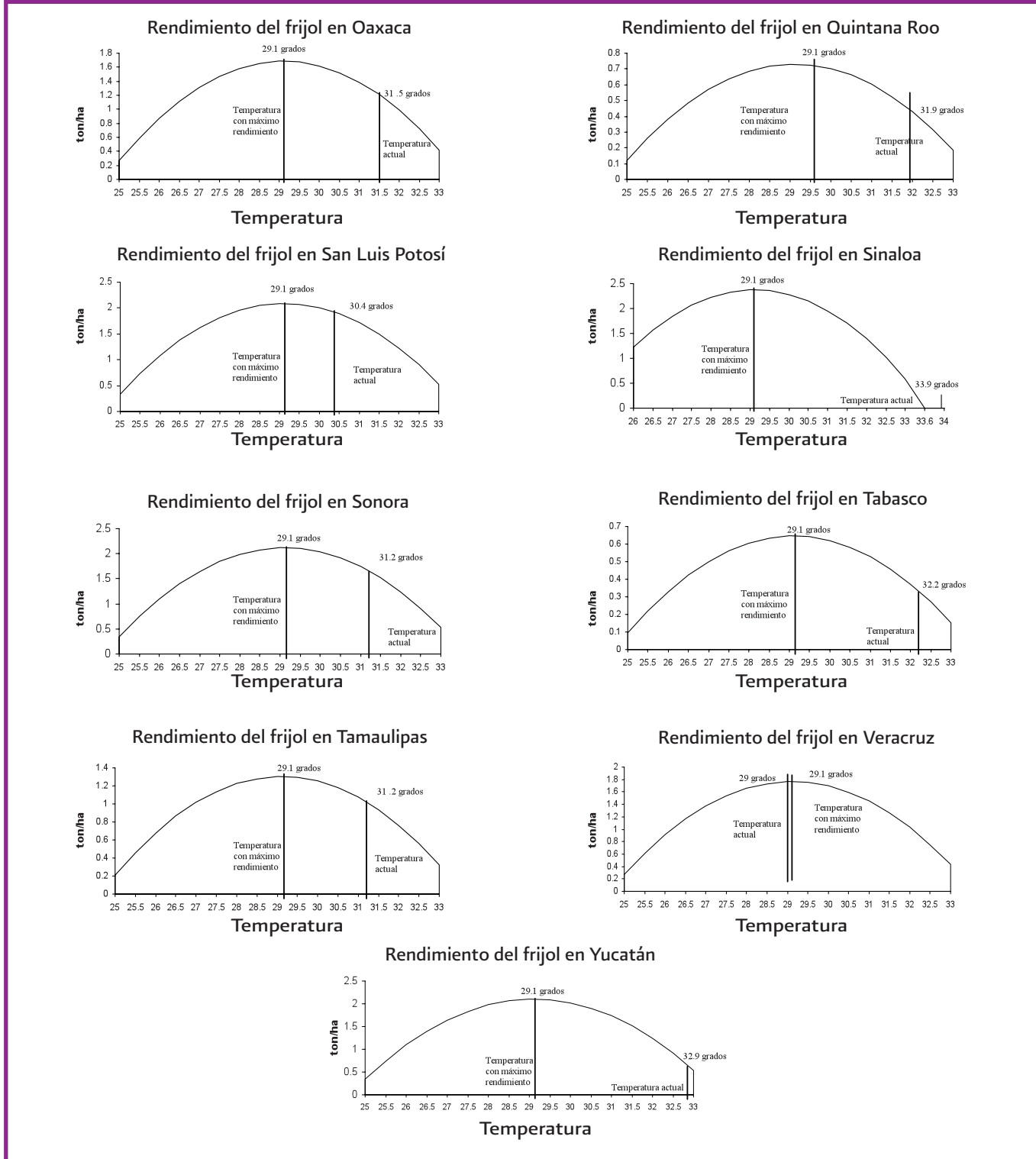
**Gráfica 47. Rendimientos teóricos del frijol en los Estados con temperaturas actuales menores a la temperatura óptima (con ganancias potenciales teóricas por el aumento de temperatura) (Continuación)**



**Gráfica 48. Rendimientos teóricos del frijol en los Estados con temperaturas actuales mayores a la temperatura óptima (con pérdidas potenciales teóricas por el aumento de temperatura)**

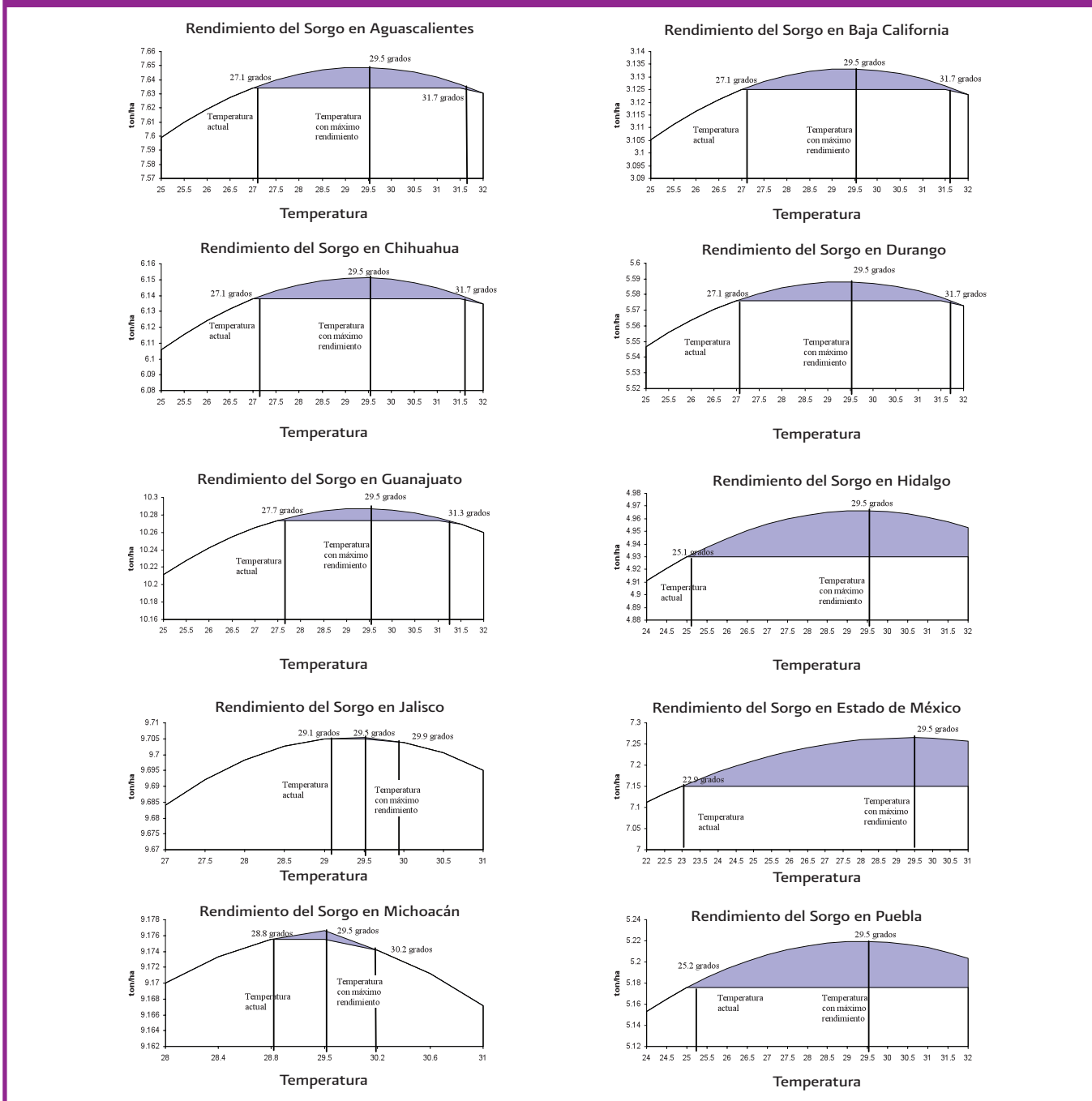


**Gráfica 48. Rendimientos teóricos del frijol en los Estados con temperaturas actuales mayores a la temperatura óptima (con pérdidas potenciales teóricas por el aumento de temperatura) (Final)**

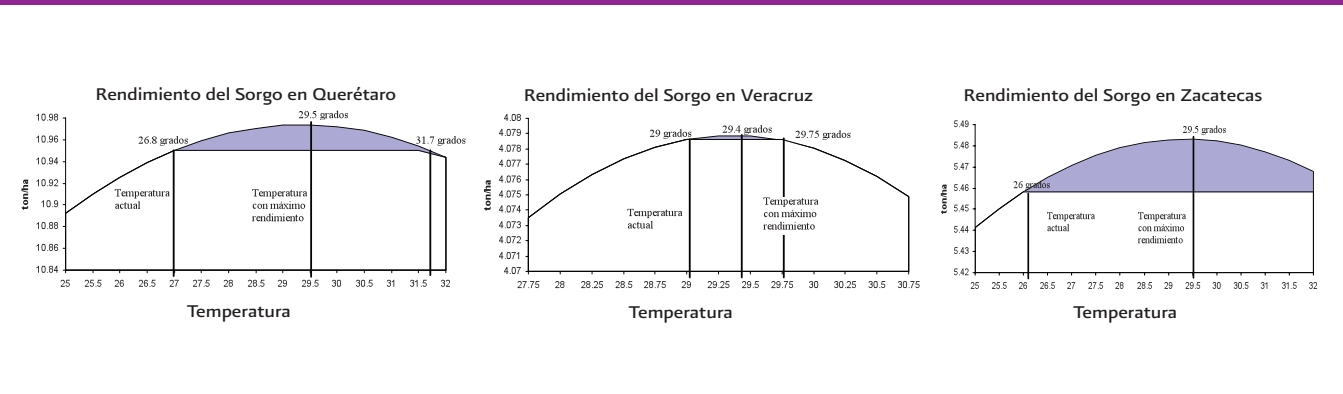


6.6. El cultivo del sorgo muestra que existen Estados que aún podrán aumentar sus rendimientos por el incremento de la temperatura aunque la mayoría de los Estados muestran riesgos significativos al cambio climático. No obstante destaca que varios Estados han realizado procesos de adaptación e innovación que han permitido mantener un aumento en los rendimientos de este producto (Gráficas 49 y 50). Finalmente, debe mencionarse que existen incluso Estados que están dejando de producir el sorgo como Yucatán y Tabasco.

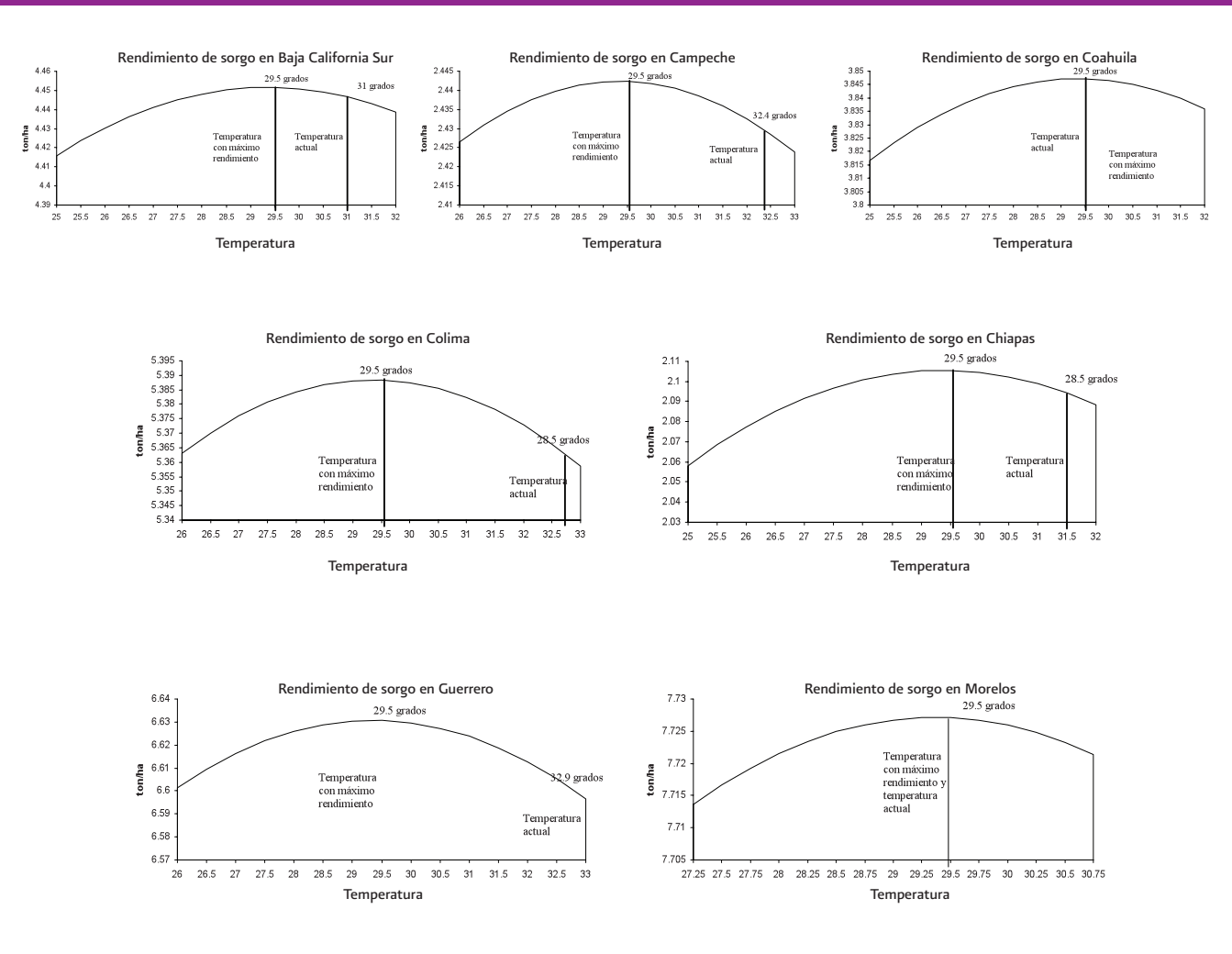
**Gráfica 49. Rendimientos teóricos del sorgo en los Estados con temperaturas actuales menores a la temperatura óptima (con ganancias potenciales teóricas por el aumento de temperatura)**



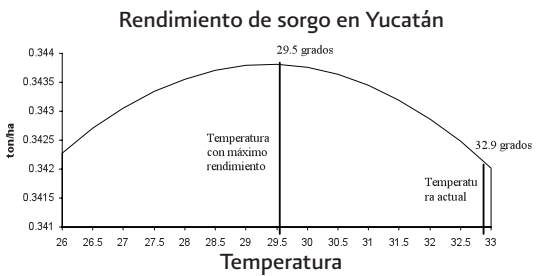
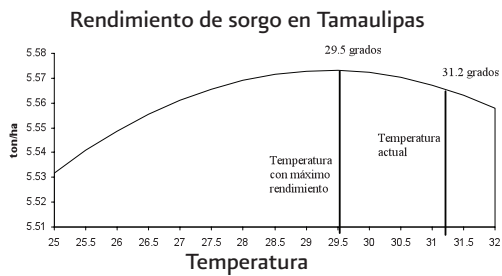
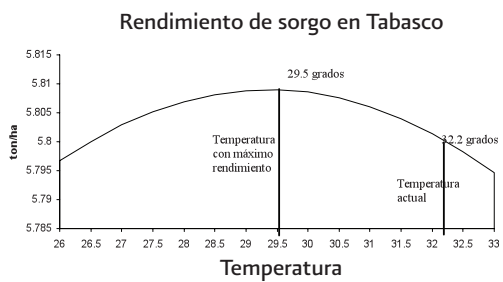
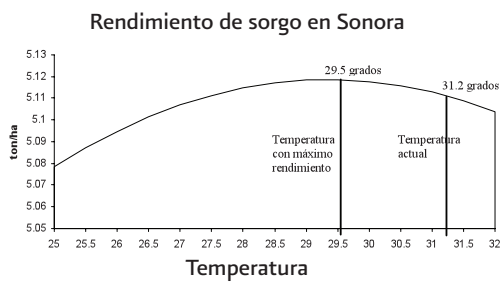
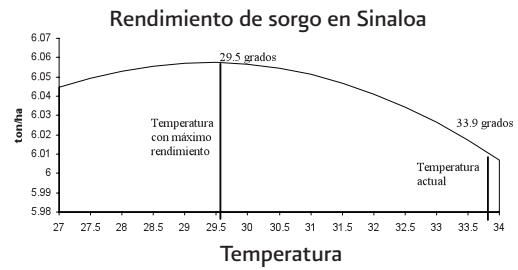
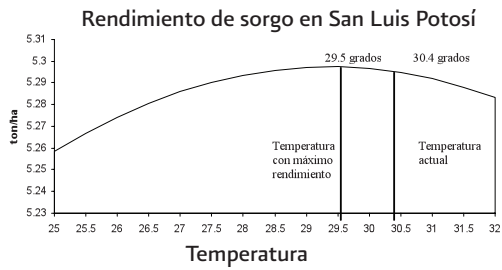
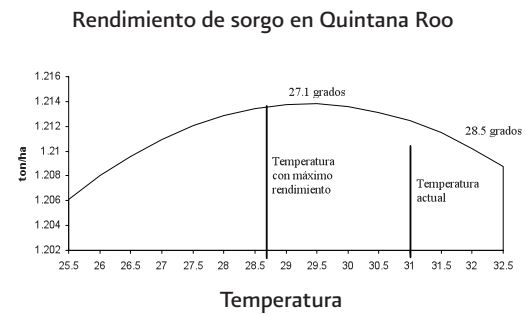
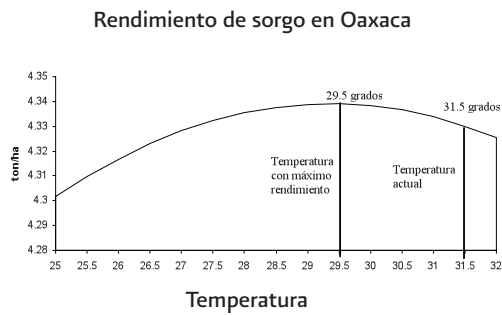
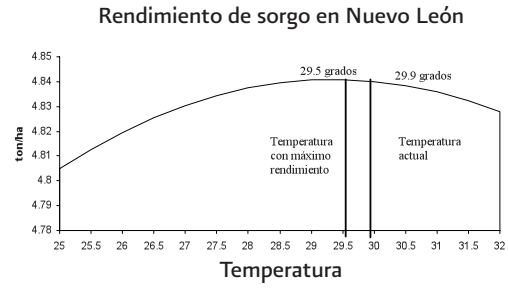
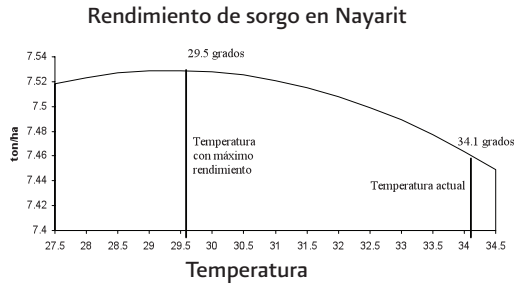
**Gráfica 49. Rendimientos teóricos del sorgo en los Estados con temperaturas actuales menores a la temperatura óptima (con ganancias potenciales teóricas por el aumento de temperatura) (Continuación)**



**Gráfica 50. Rendimiento teórico del sorgo en los estados con temperaturas actuales mayores a la temperatura óptima (con pérdidas potenciales teóricas por el aumento de temperatura)**

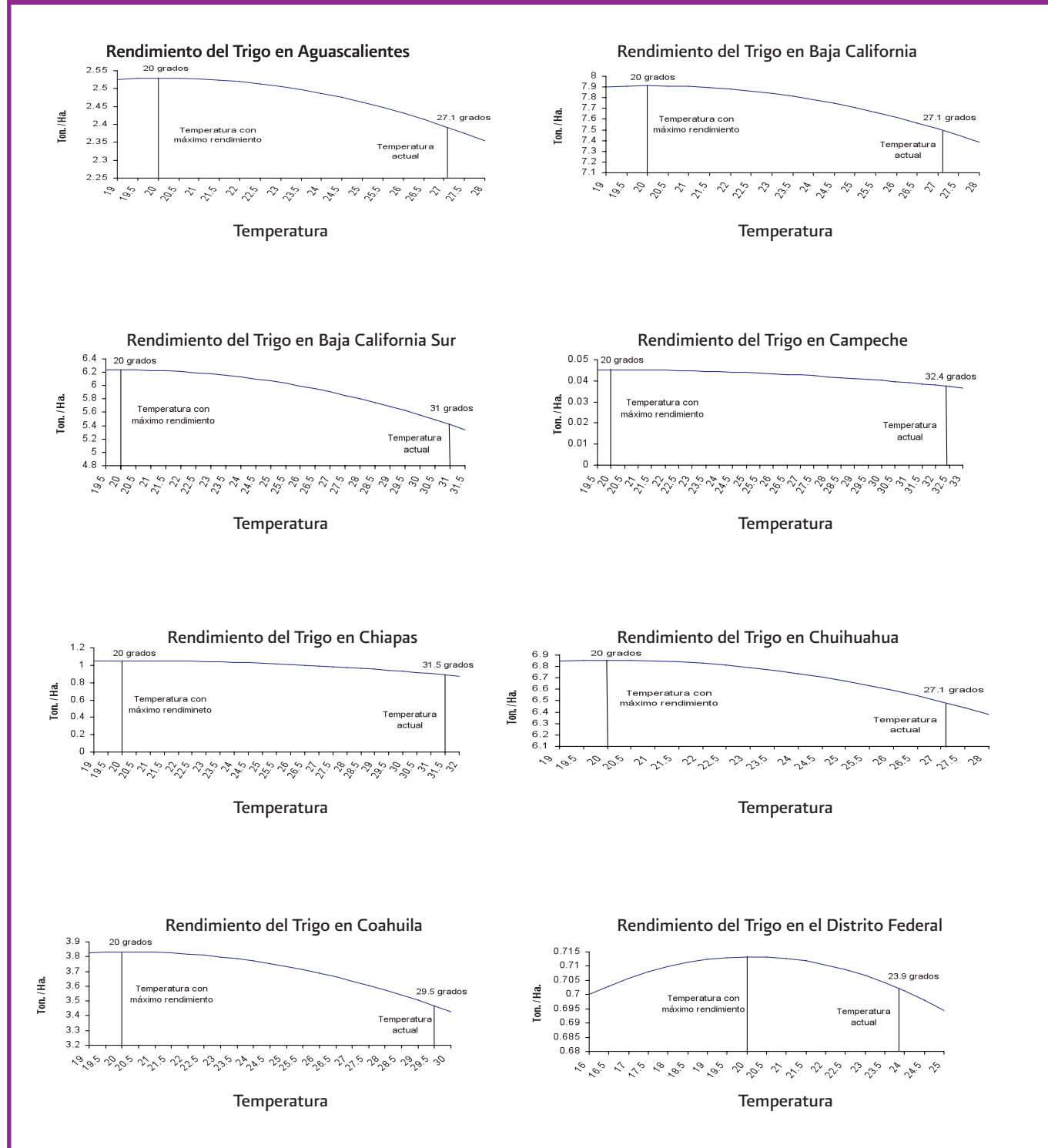


**Gráfica 50. Rendimiento teórico del sorgo en los estados con temperaturas actuales mayores a la temperatura óptima (con pérdidas potenciales teóricas por el aumento de temperatura) (Continuación)**



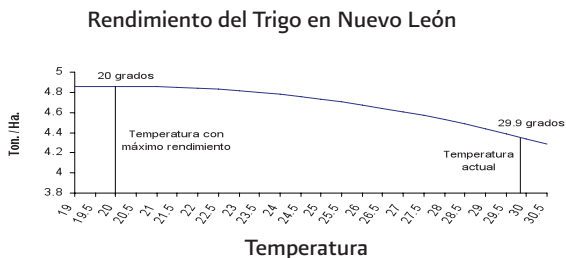
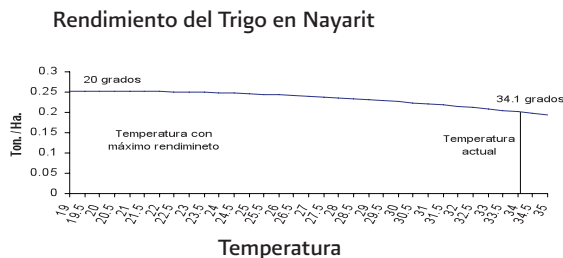
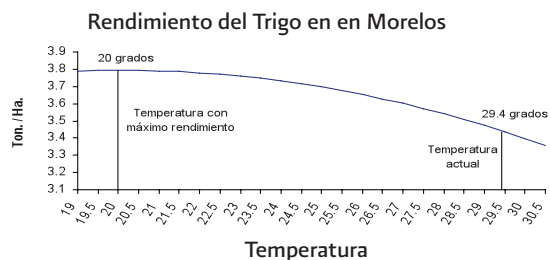
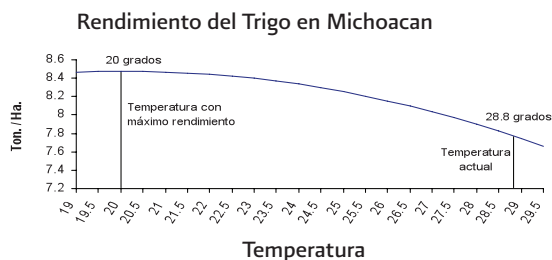
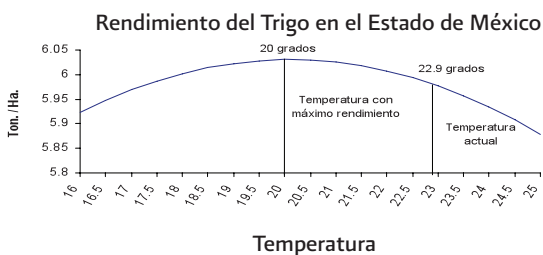
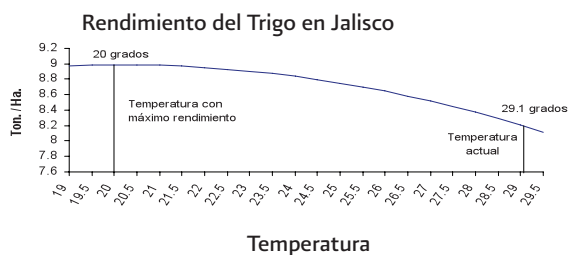
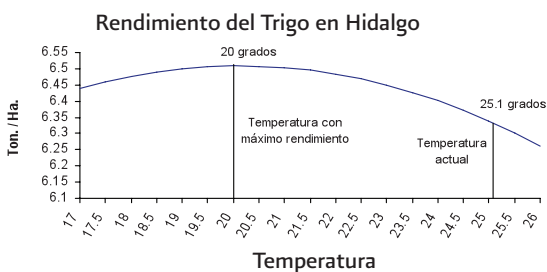
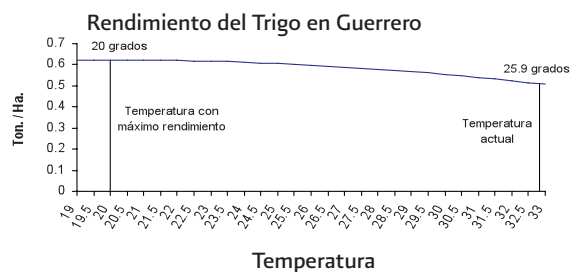
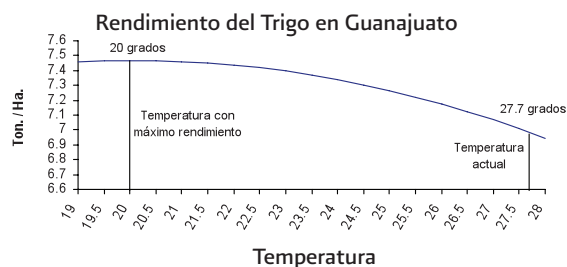
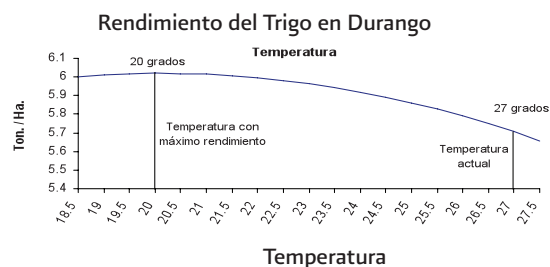
6.7. Los Estados productores de trigo, sintetizados en la Gráfica 51, muestran un alto nivel de vulnerabilidad al cambio climático ya que los Estados más sensibles a una caída en la producción son los de mayor rendimiento.

**Gráfica 51. Rendimiento teórico del trigo en los Estados con temperaturas actuales mayores a la temperatura óptima (con pérdidas potenciales teóricas por el aumento de temperatura)**

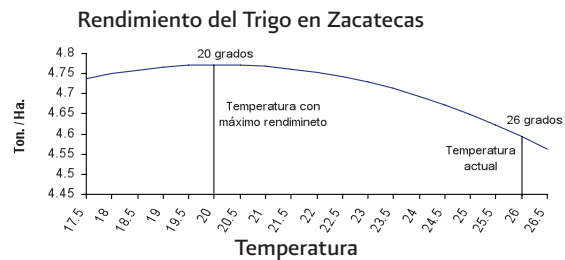
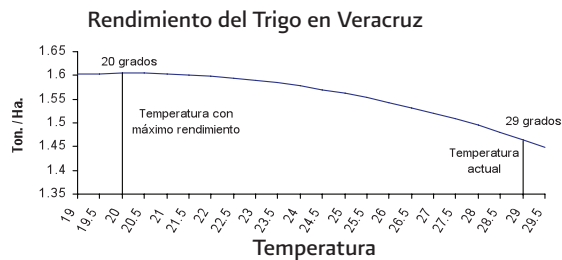
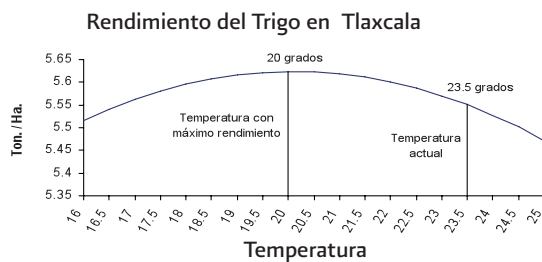
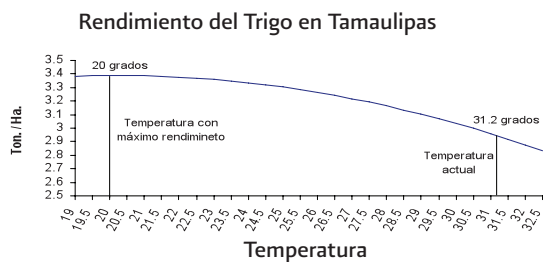
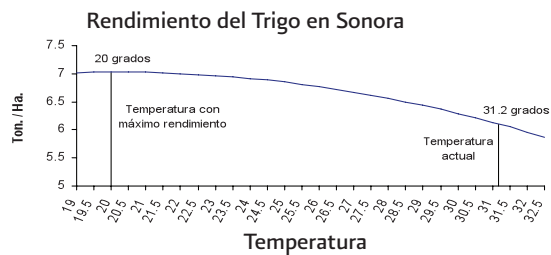
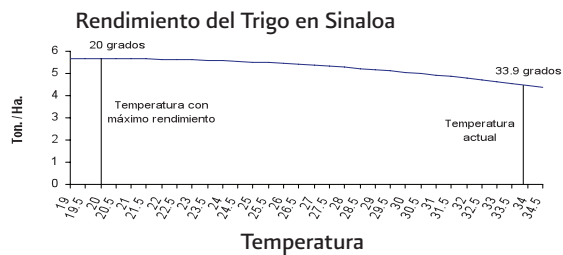
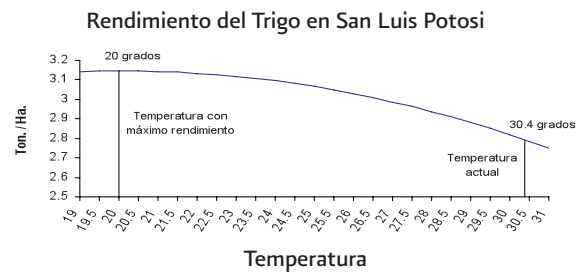
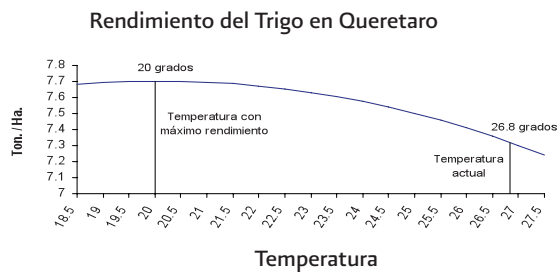
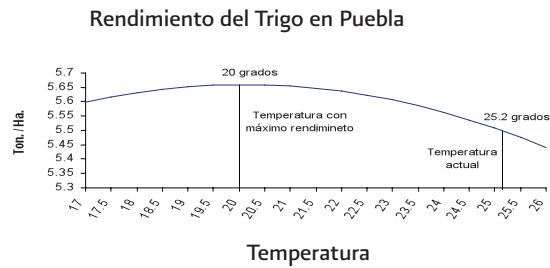
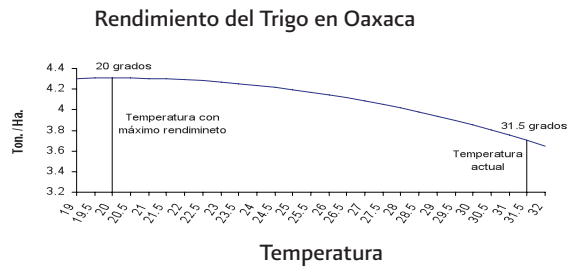




**Gráfica 51. Rendimiento teórico del trigo en los Estados con temperaturas actuales mayores a la temperatura óptima (con pérdidas potenciales teóricos por el aumento de temperatura) (Continuación)**

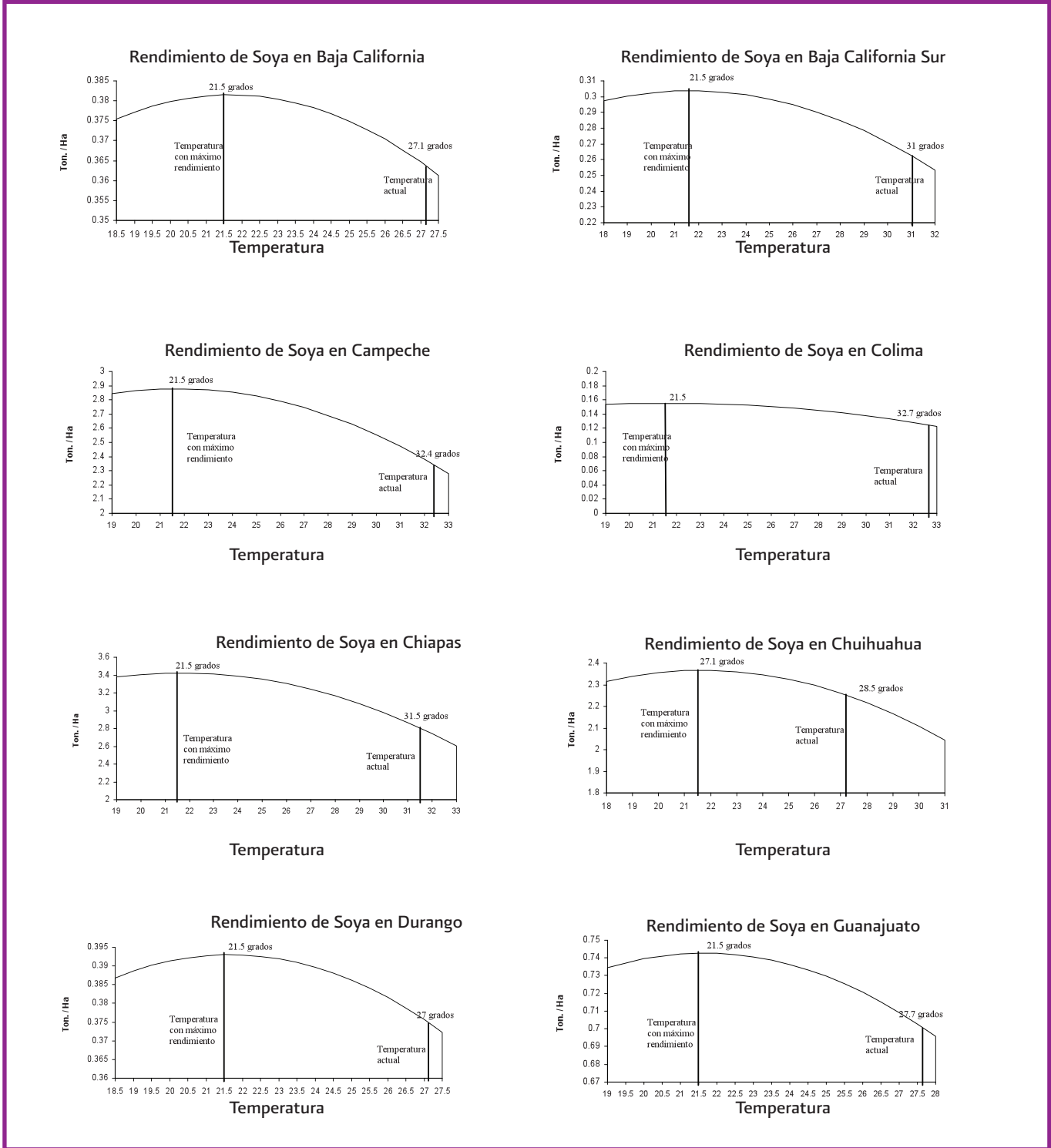


**Gráfica 51. Rendimiento teórico del trigo en los Estados con temperaturas actuales mayores a la temperatura óptima (con pérdidas potenciales teóricas por el aumento de temperatura) (Final)**

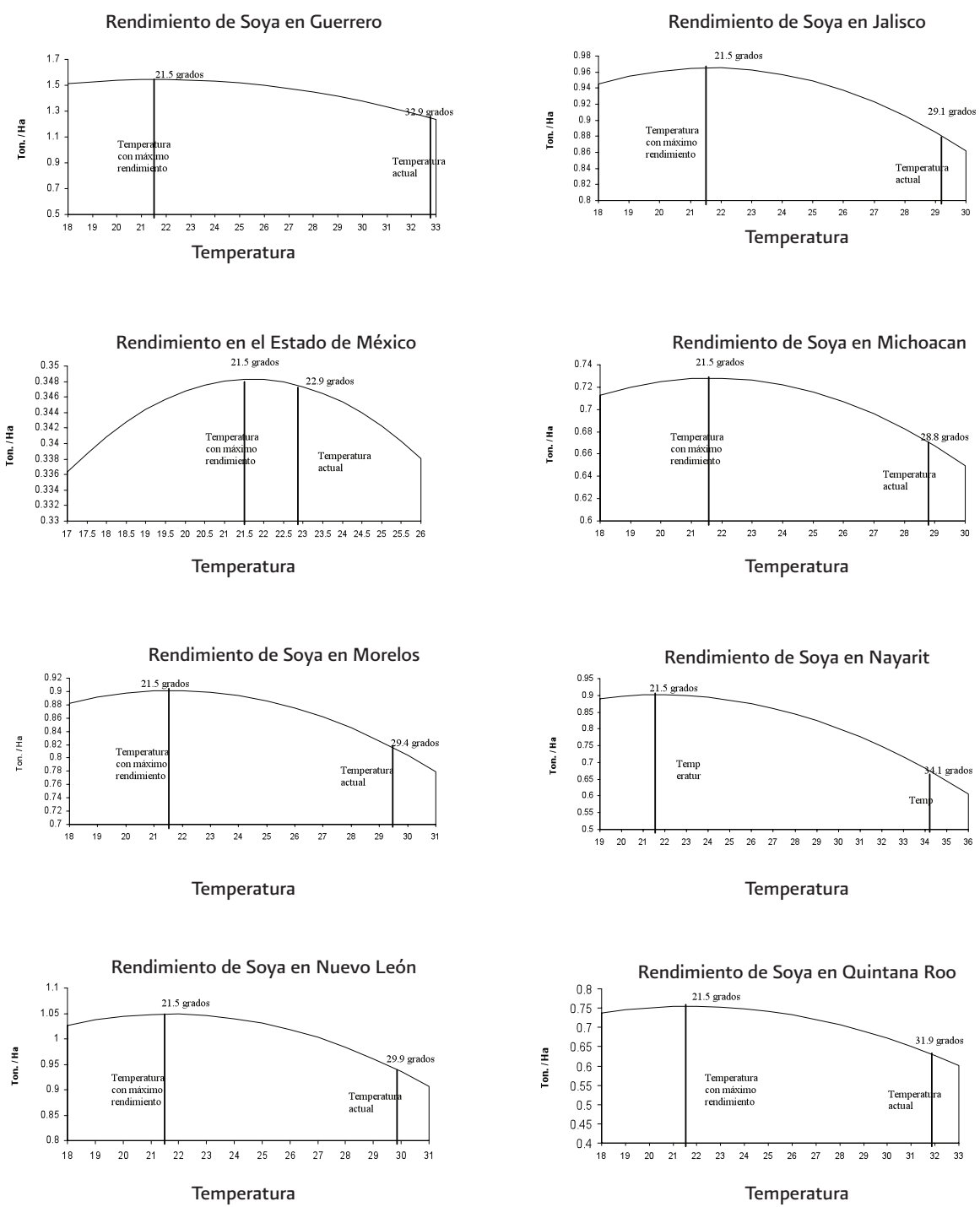


6.8. El cultivo de la soya muestra también la presencia de riesgos ya significativos asociados al cambio climático (Gráfica 52).

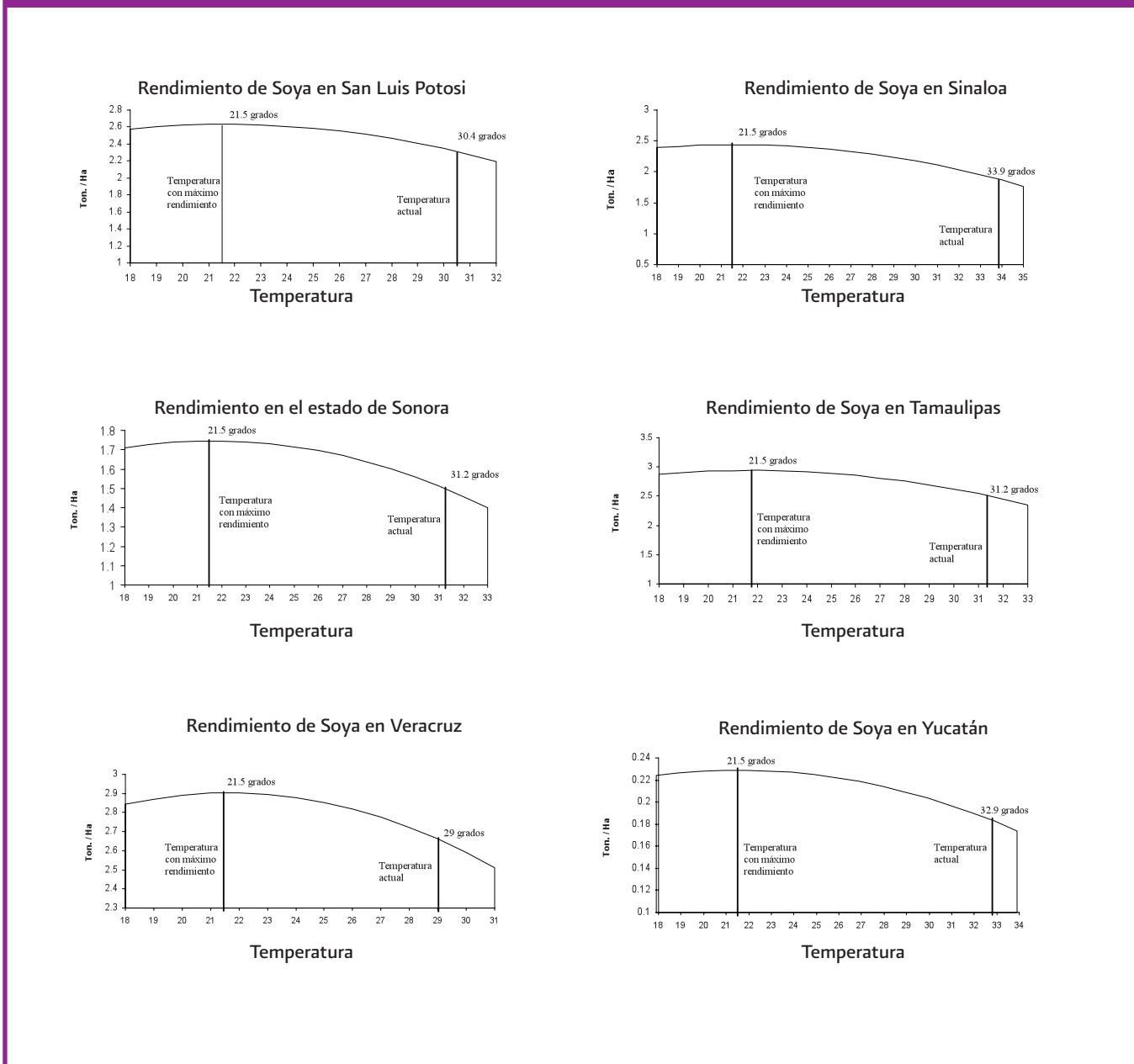
**Gráfica 52. Rendimiento teórico de la Soya en los Estados con temperaturas actuales mayores a la temperatura óptima (con pérdidas potenciales teóricas por el aumento de temperatura)**



**Gráfica 52. Rendimiento teórico de la Soya en los Estados con temperaturas actuales mayores a la temperatura óptima (con pérdidas potenciales teóricas por el aumento de temperatura) (Continuación)**

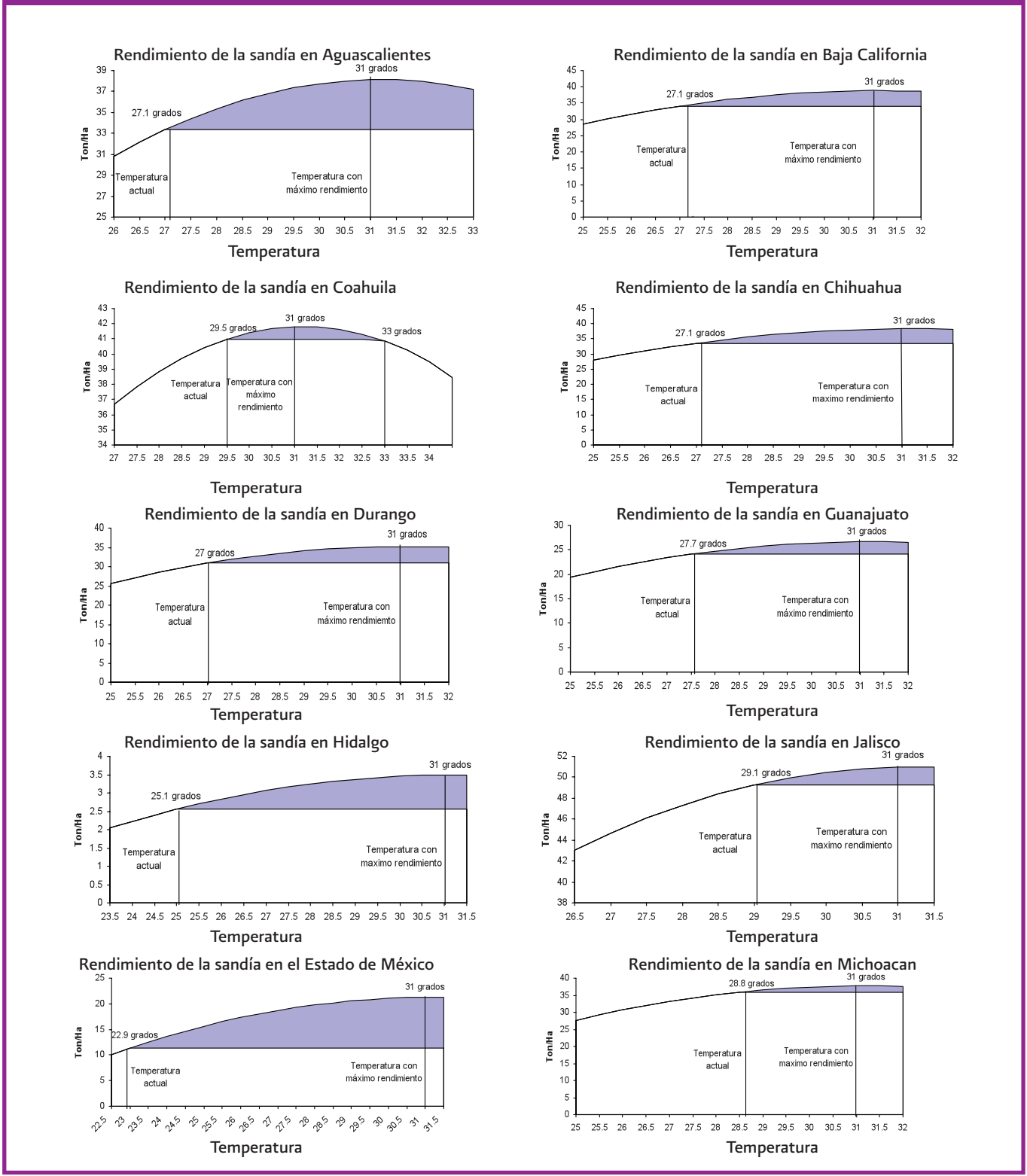


**Gráfica 52. Rendimiento teórico de la Soya en los Estados con temperaturas actuales mayores a la temperatura óptima (con pérdidas potenciales teóricos por el aumento de temperatura) (Final)**

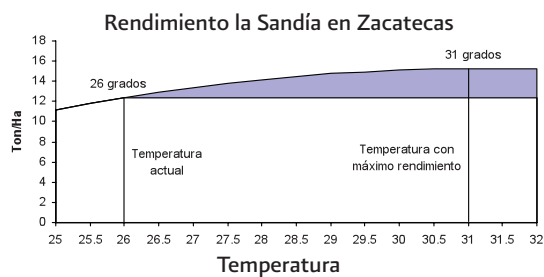
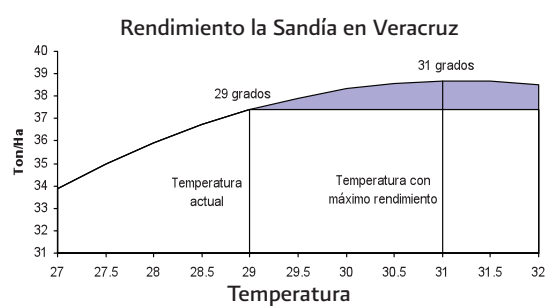
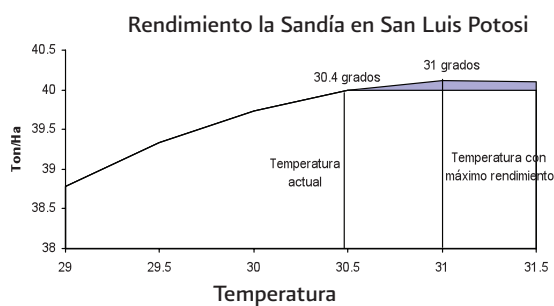
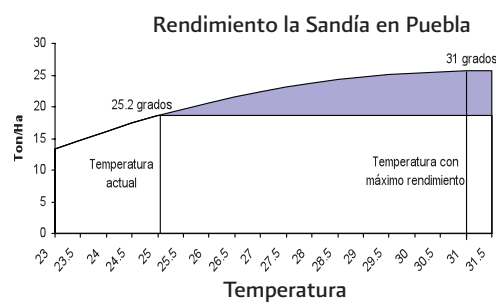
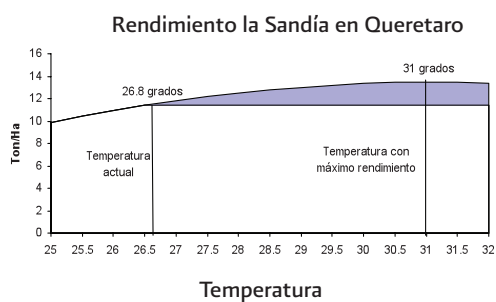
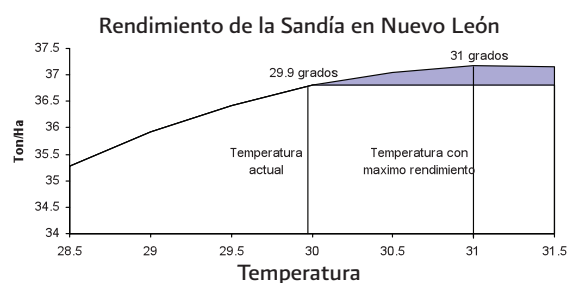
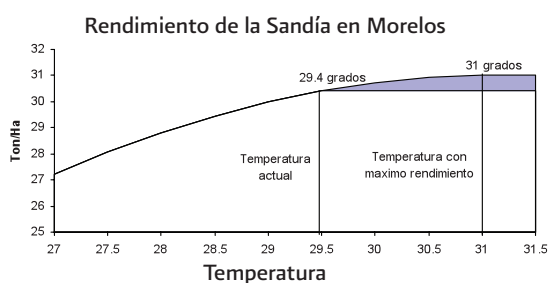


6.9. En el cultivo de sandía se observan Estados que aun presentarán ganancias importantes asociadas a cambios en la temperatura tales como el Estado de México, Chihuahua, Michoacán, Jalisco, Veracruz, entre otros. Por su parte, los Estados con mayor riesgo son Campeche, Colima, Guerrero, Morelos, Tabasco, Tamaulipas, Quintana Roo y Sonora (Gráficas 53 y 54).

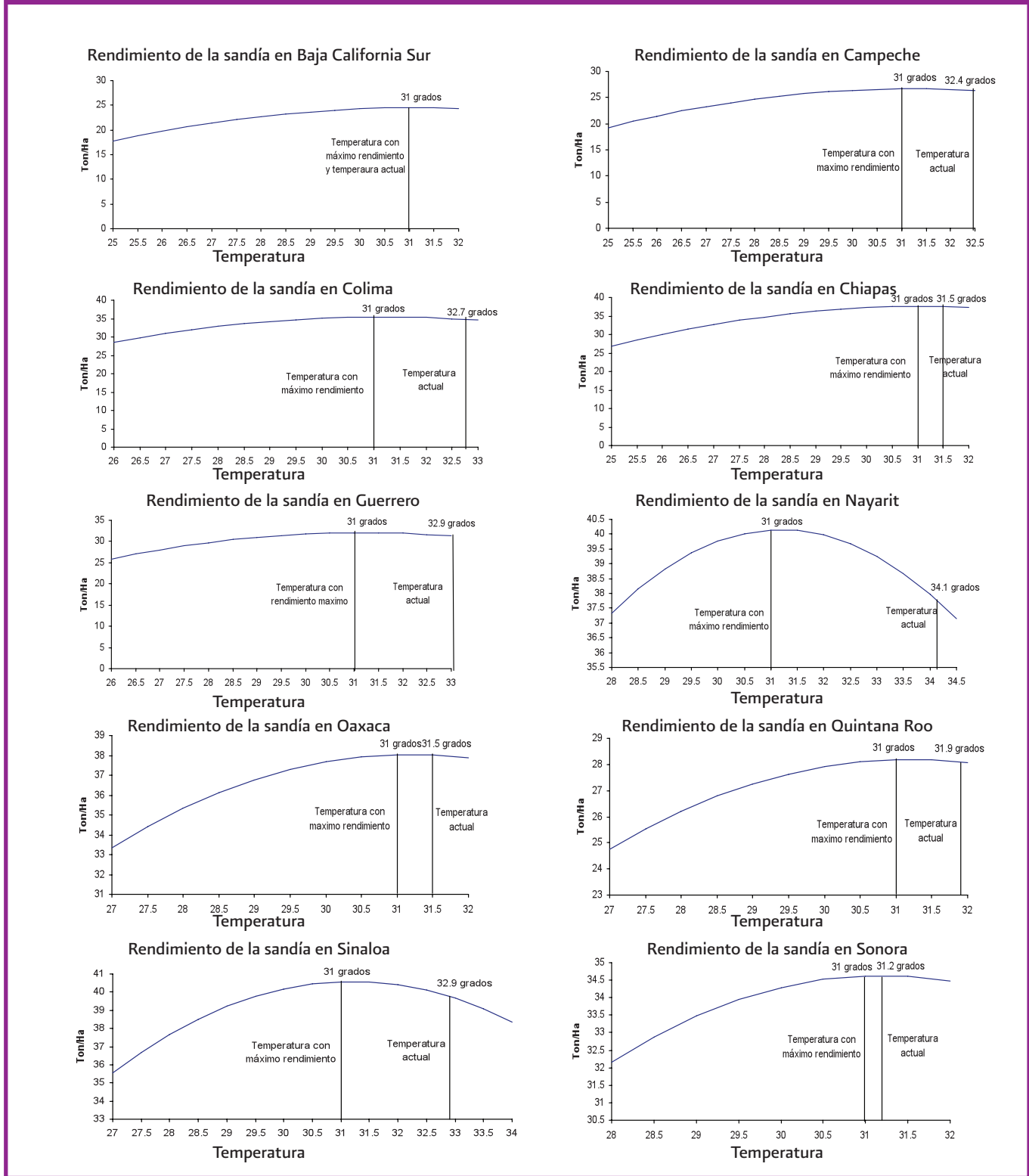
**Gráfica 53. Rendimiento teórico de la sandía en los Estados con temperaturas actuales menores a la temperatura óptima (con ganancias potenciales teóricos por el aumento de temperatura)**



**Gráfica 53. Rendimiento teórico de la sandía en los Estados con temperaturas actuales menores a la temperatura óptima (con ganancias potenciales teóricos por el aumento de temperatura) (Continuación)**

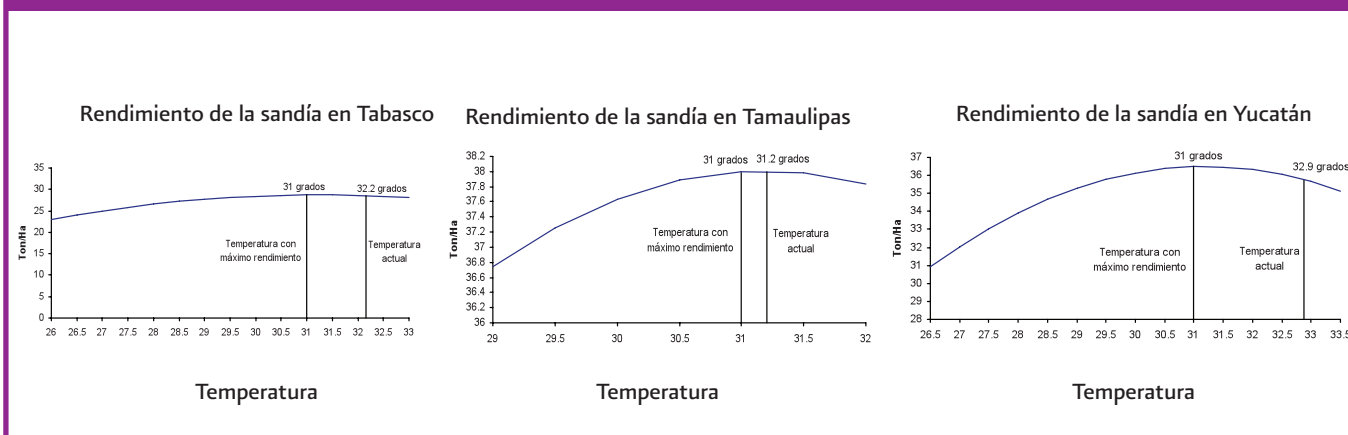


**Gráfica 54. Rendimiento teórico de la sandía en los Estados con temperaturas actuales mayores a la temperatura óptima (con pérdidas potenciales teóricas por el aumento de temperatura)**





**Gráfica 54. Rendimiento teórico de la sandía en los Estados con temperaturas actuales mayores a la temperatura óptima (con pérdidas potenciales teóricas por el aumento de temperatura) (Continuación)**



Así, los Estados que parecen tener un aumento potencial en los rendimientos asociado al incremento de la temperatura se ubican en el centro del país como el Estado de México, Puebla, Hidalgo o Tlaxcala. Se observa además que los Estados con mayor riesgo en su producción agrícola se dividen en dos grupos: por un lado, aquellos como Oaxaca, Chiapas, Campeche, Tabasco, Veracruz y Yucatán que están resintiendo los impactos climáticos, y aquellos que están realizando procesos de adaptación más exitosos, no obstante los fuertes impactos climáticos, tales como Sinaloa, Michoacán, Sonora y Jalisco. Ello indica nuevamente la importancia de los procesos de adaptación y su correspondencia relativa a los niveles de ingreso.

7. El análisis para las actividades pecuarias se basó en las toneladas de carne de canal de cuatro ganados: bovino, caprino, ovino y porcino, en función de las variables climáticas temperatura, precipitación o en algunos casos las desviaciones de la precipitación (DPREC). Asimismo, se incluyeron a las variables de ingreso que tienen un efecto positivo sobre la producción y la población que representa una variable de presión con efecto negativo. Los modelos estimados (Cuadro 18 y Gráfica 55) muestran un ajuste razonable y las pruebas de especificación, con excepción del modelo de producción de carne de ganado bovino, cumplen con los supuestos de modelo clásico de regresión lineal. Es decir, los errores se distribuyen normalmente, no existe autocorrelación ni presencia de heteroscedasticidad y el término de error estacionario. Para el caso del modelo de bovino, se cumple con los supuestos de normalidad y de heteroscedasticidad, sin embargo, presenta autocorrelación lo que debilita las conclusiones que se derivan del modelo. Los valores observados y estimados para los cuatro modelos se muestran en la Gráfica 55. Se aprecia que los valores estimados siguen ampliamente la tendencia de los valores observados, reflejando así la capacidad de los modelos planteados.

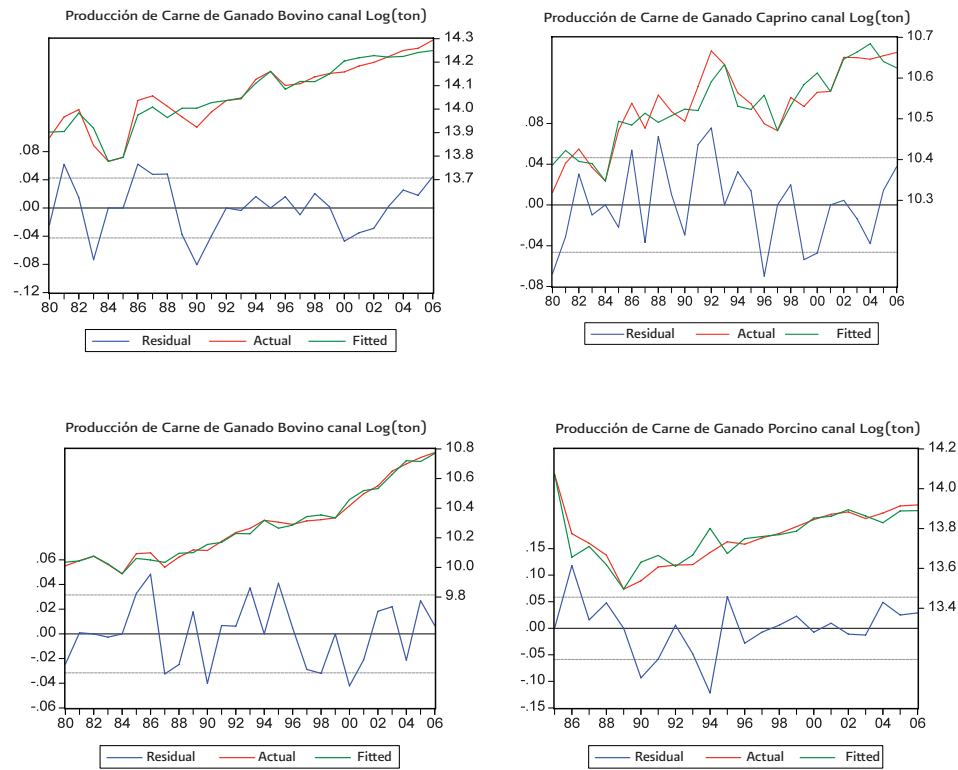
7.1. Dada la sensibilidad de la producción de carne ante variaciones de la temperatura, conviene relacionar directamente estas variables. En la Gráfica 56 se muestra la temperatura que permitiría obtener el máximo de producción que en todos los casos que se ubican por debajo de las temperaturas actuales. Sin embargo, es posible observar que existen formas más accesibles de adaptación en estas actividades. En todo caso, este análisis es sólo indicativo ya que existen variables adicionales tales como límite de agua más estrictas y opciones de movilidad para adaptarse al clima que hacen que las restricciones climáticas se maten.

## CUADRO 18. ECUACIONES DE LA PRODUCCIÓN PECUARIA

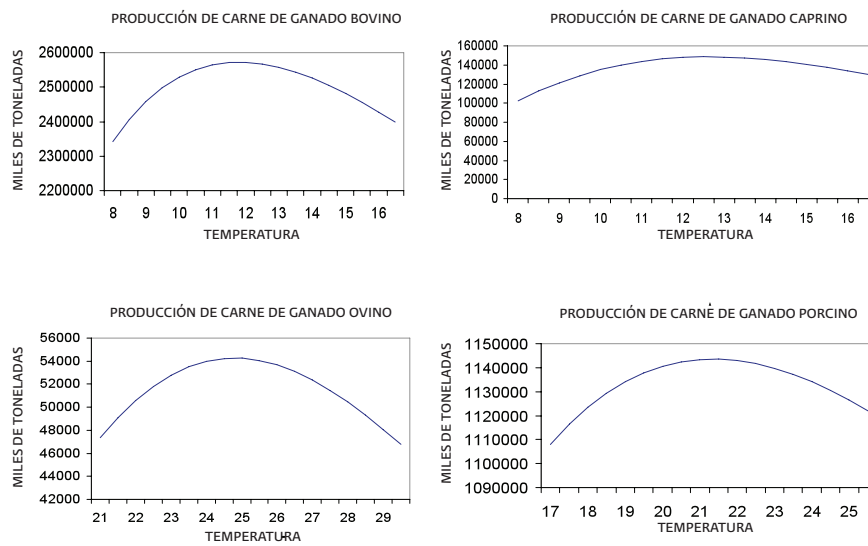
	Producción de carne de ganado bovino canal Log (ton)	Producción de carne de ganado caprino canal Log (ton)	Producción de carne de ganado ovino canal Log (ton)	Producción de carne de ganado porcino canal Log (ton)
T		0.012267 (8.065758)	0.11218 (13.10102)	
LTE	3.06979168 (3.387172)	9.150403 (9.472152)	31.68146 (2.062952)	3.714662 (2.910511)
LTE^2	-0.621896887 (-2.389447)	-1.807178 (-6.246866)	-4.933972 (-2.177344)	-0.606708 (-1.708436)
DPREC	-0.00032031 (-2.532463)	-0.000125 (-0.910762)		-0.000675 (-3.092582)
LPREC			12.50527 (1.485091)	
LPREC^2			-0.907321 (-1.463049)	
LPOB			-10.69902 (-9.615136)	
LY	1.182280398 (10.01893)			0.887659 (4.212112)
D82			0.10467 (2.581219)	
D84	-0.159239674 (-3.383311)	-0.133054 (-2.596026)	-0.113041 (-3.229773)	
D85	-0.193933981 (-4.19045)			0.42678 (6.582943)
D89				-0.181145 (-2.873252)
D93		0.089052 (1.84247)		
D94			0.14478 (3.664125)	
D95	0.132379509 (2.871237)			
D97		-0.11703 (-2.449059)		
D99			-0.09085 (-2.737562)	
D01		-0.088729 (-1.758903)		
R <sup>2</sup>	0.929239	0.84007	0.988841	0.865258
<b>Pruebas de especificación</b>				
Jarque-Bera	0.542608 (0.762385)	0.604561 (0.739131)	.965292 (0.617148)	1.023343 (0.599493)
LM	4.95187 (0.026062)	0.001821 (0.96596)	0.051953 (0.819700)	0.355128 (0.551225)
ARCH	0.008804 0.925244	0.125543 (0.723099)	0.484002 (0.486615)	0.03538 (0.850801)
ADF	-3.46 (0.06)	-5.09 (0.001)	-4.25 (0.02)	-3.04 (0.15)

Notas: Los números entre paréntesis indican el estadístico t; para el caso de las pruebas de especificación muestran el valor p (probabilidad).

**Gráfica 55. Valores reales y proyectos de los modelos producción pecuaria**



**Gráfica 56. Efecto de la temperatura en la producción pecuaria**



El conjunto de modelos estimados permite entonces realizar inferencias sobre el costo económico del cambio climático en la agricultura mexicana como proporción del PIB al 2050 y al 2100 para distintas tasas de descuento y escenarios climáticos. De este modo, con una tasa de descuento de 4%, el costo del cambio climático como proporción del PIB en la producción de productos cíclicos es de 0.02% mientras que para los productos perennes es de 1.72% en el modelo A2 para el 2100 (Cuadro 19).

## CUADRO 19. COSTOS TOTALES DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL SECTOR AGRÍCOLA AL 2050 Y 2100 BAJO DIFERENTES ESCENARIOS (PORCENTAJE DEL PIB)

Modelo	2050			2100		
	Tasa de descuento			Tasa de descuento		
	0.5%	2%	4%	0.5%	2%	4%
Índice de producción de los productos cíclicos						
B1	0.01%	0.00%	0.00%	0.08%	0.03%	0.01%
A1B	0.02%	0.01%	0.01%	0.19%	0.07%	0.02%
A2	0.01%	0.01%	0.00%	0.21%	0.07%	0.02%
Índice de producción de los productos perennes						
B1	2.18%	1.42%	0.79%	7.74%	3.43%	1.34%
A1B	2.80%	1.82%	1.07%	10.96%	4.76%	1.89%
A2	2.50%	1.61%	0.89%	11.26%	4.73%	1.72%
Rendimiento del maíz						
B1	1.30%	0.84%	0.47%	5.85%	2.46%	0.90%
A1B	1.96%	1.26%	0.70%	10.75%	4.34%	1.50%
A2	1.59%	1.02%	0.56%	10.97%	4.26%	1.39%
Rendimiento del frijol						
B1	-0.04%	-0.03%	-0.02%	0.35%	0.10%	0.02%
A1B	0.03%	0.01%	0.00%	1.38%	0.46%	0.11%
A2	-0.01%	-0.01%	-0.01%	1.50%	0.49%	0.11%
Rendimiento del trigo						
B1	0.10%	0.07%	0.04%	0.37%	0.16%	0.06%
A1B	0.14%	0.09%	0.05%	0.54%	0.24%	0.09%
A2	0.12%	0.08%	0.04%	0.54%	0.23%	0.08%
Rendimiento del sorgo						
B1	0.12%	0.12%	0.11%	0.14%	0.14%	0.14%
A1B	0.17%	0.17%	0.16%	0.21%	0.21%	0.21%
A2	0.13%	0.13%	0.13%	0.18%	0.18%	0.17%
Rendimiento de la soya						
B1	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
A1B	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.00%	0.00%
A2	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.00%	0.00%
Rendimiento de la sandía						
B1	-0.02%	-0.01%	-0.01%	-0.04%	-0.02%	-0.01%
A1B	-0.02%	-0.01%	-0.01%	-0.02%	-0.01%	-0.01%
A2	-0.02%	-0.01%	-0.01%	-0.01%	-0.01%	-0.01%

Nota: Los pronósticos de los modelos del índice producción de cultivos cíclicos se compara con el índice de producción de productos cíclicos calculado con el promedio de la temperatura de 1980-2006, y para el índice de producción de productos perennes se compara con el promedio del índice del 2002-2006, la misma comparación se hace con los 6 cultivos tomando el promedio de los rendimientos de 2002-2006, para hacer consistente la comparación de la producción con cambio y sin cambio climático. Los pronósticos se pasan a valor de la producción con los precios de los productos del 2006.

Los costos *indicativos* respecto al PIB de la producción pecuaria hasta el 2050 y 2100 se reportan en el Cuadro 20 donde se observa que la producción de ganado bovino será la más afectada al tener un costo, con una tasa de 4%, de 0.64% del PIB al 2100 mientras que los costos para los otros tipos de ganado son menores.

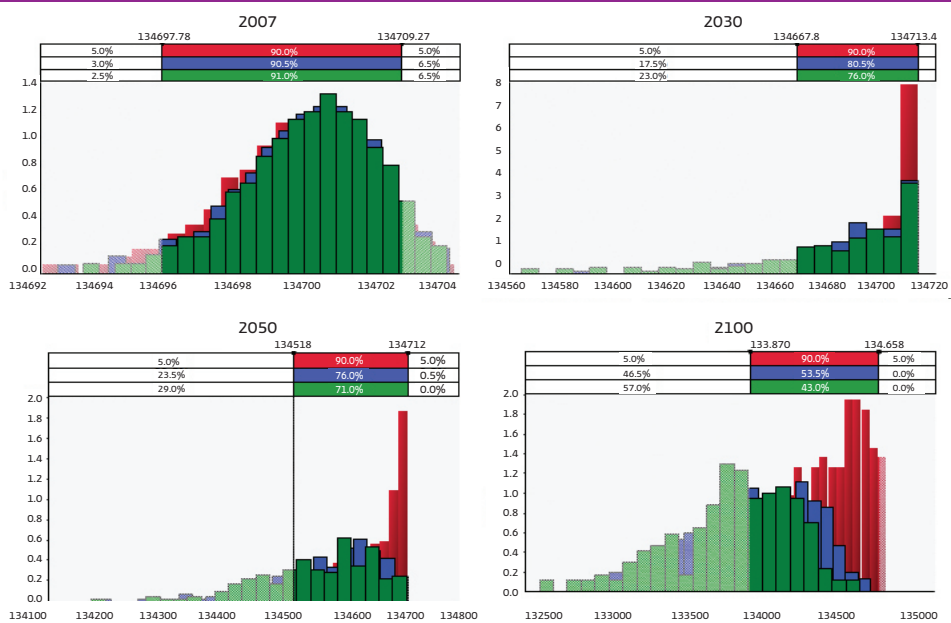
## CUADRO 20. COSTOS TOTALES DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA PRODUCCIÓN PECUARIA AL 2050 Y 2100 BAJO DIFERENTES ESCENARIOS (PORCENTAJE DEL PIB)

Modelo	2050			2100		
	Tasa de descuento			Tasa de descuento		
	0.5%	2%	4%	0.5%	2%	4%
Producción de ganado bovino						
B1	0.83%	0.54%	0.31%	2.81%	1.26%	0.52%
A1B	1.04%	0.68%	0.40%	3.78%	1.67%	0.68%
A2	0.94%	0.61%	0.35%	3.85%	1.65%	0.64%
Producción de ganado caprino						
B1	0.07%	0.05%	0.03%	0.23%	0.10%	0.04%
A1B	0.09%	0.06%	0.03%	0.30%	0.14%	0.06%
A2	0.08%	0.05%	0.03%	0.31%	0.13%	0.05%
Producción de ganado ovino						
B1	0.06%	0.04%	0.07%	0.22%	0.10%	0.30%
A1B	0.08%	0.05%	0.03%	0.31%	0.13%	0.05%
A2	0.07%	0.05%	0.03%	0.31%	0.13%	0.05%
Producción de ganado porcino						
B1	0.18%	0.12%	0.07%	0.63%	0.28%	0.11%
A1B	0.23%	0.15%	0.09%	0.88%	0.38%	0.15%
A2	0.20%	0.13%	0.08%	0.90%	0.38%	0.14%

Nota: Los pronósticos de los modelos de la producción pecuaria para cada modelo de cambio climático se compara con los productos del 2006.

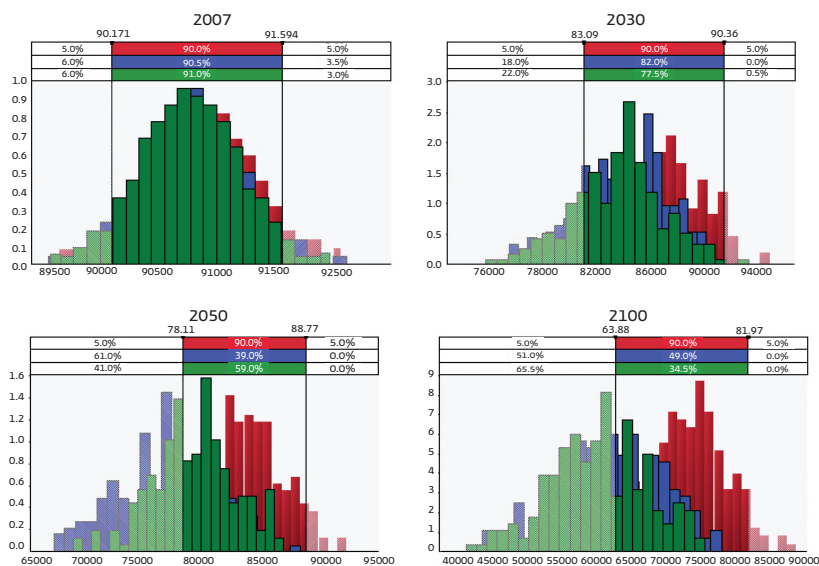
El análisis del riesgo para el conjunto de los modelos de agricultura estimados con diferentes escenarios de cambio climático para el 2100 puede realizarse con base en el uso de diversas Simulaciones Monte Carlo (Modelo de simulación en excel de variables de riesgo e incertidumbre). La Gráfica 57 correspondiente al índice de los cultivos cíclicos muestra que los tres escenarios tienen, actualmente, impactos previstos muy similares, no obstante, con el tiempo, los escenarios A2 y A1B implican mayores riesgos. Este resultado es similar para los cultivos perennes (Gráfica 58).

**Gráfica 57. Análisis de riesgo del valor de la producción de los cultivos cíclicos con los distintos escenarios de cambio climático**



Nota: La distribución de color rojo corresponde al escenario climático B1, la distribución azul es del escenario A1B y la distribución verde al escenario A2 del IPCC. El valor de la producción está en miles de pesos. Estas simulaciones fueron hechas con el modelo del índice de producción de cultivos cíclicos. Simulaciones de Monte Carlo con 200 iteraciones.

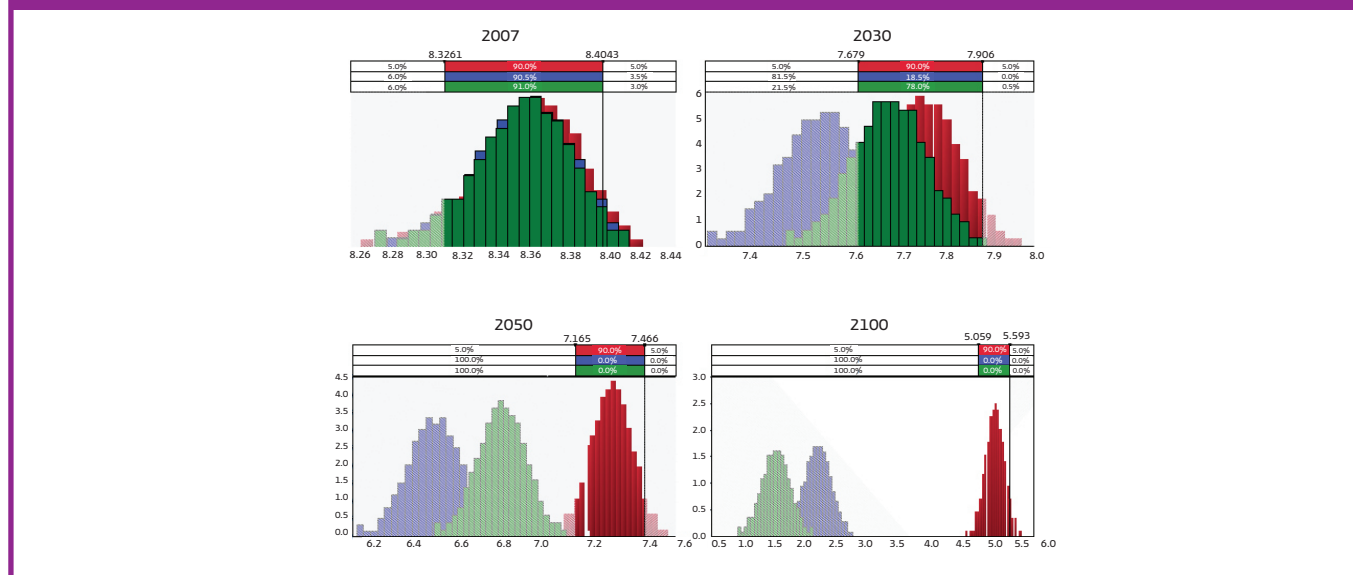
**Gráfica 58. Análisis de riesgo del valor de la producción de los cultivos perennes con los distintos escenarios de cambio climático**



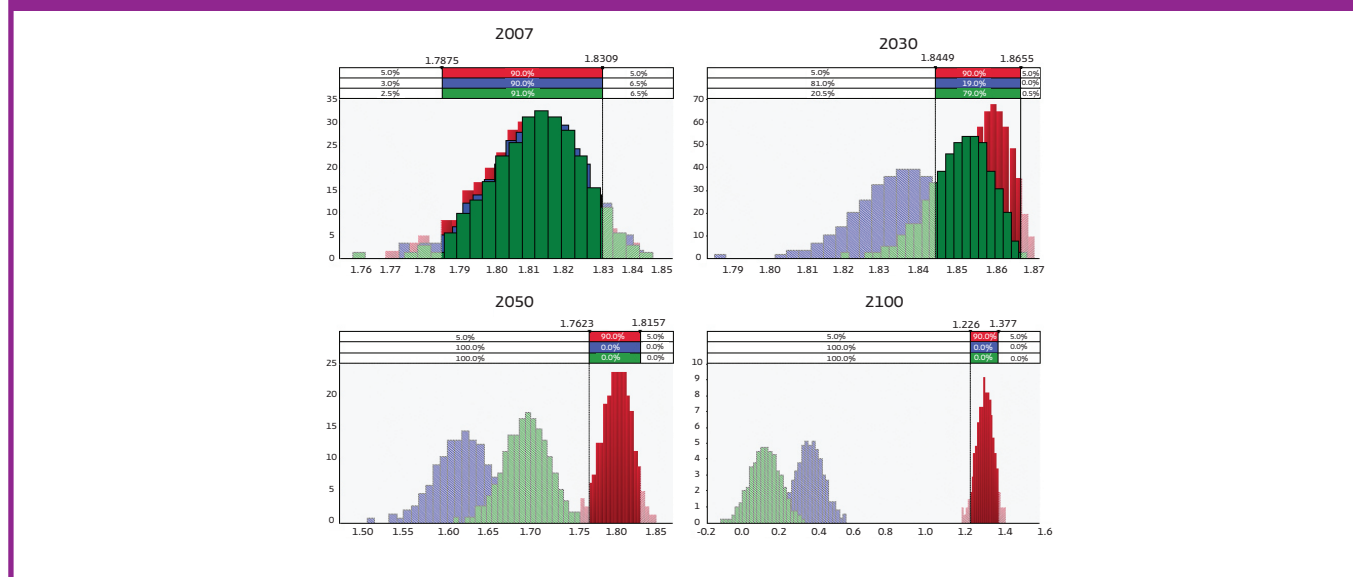
Nota: La distribución de color rojo corresponde al escenario climático B1, la distribución azul es del escenario A1B y la distribución verde al escenario A2 del IPCC. El Valor de la producción esta en miles de pesos. Estas simulaciones fueron hechas con el modelo del índice de producción de cultivos perennes. Simulaciones de Monte Carlo con 200 iteraciones.

Este análisis para los rendimientos de los distintos cultivos se observa que las distribuciones de probabilidad para el maíz y el frijol en cada uno de los escenarios climáticos se separan a partir de 2050 (Gráficas 59 y 60). Por el contrario, en los casos del trigo, el sorgo y la soya los escenarios climáticos muestran incluso en el 2100 un área importante de intersección (Gráficas 61, 62, 63 y 64).

**Gráfica 59. Análisis de riesgo de los rendimientos del maíz con los diferentes escenarios de cambio climático**

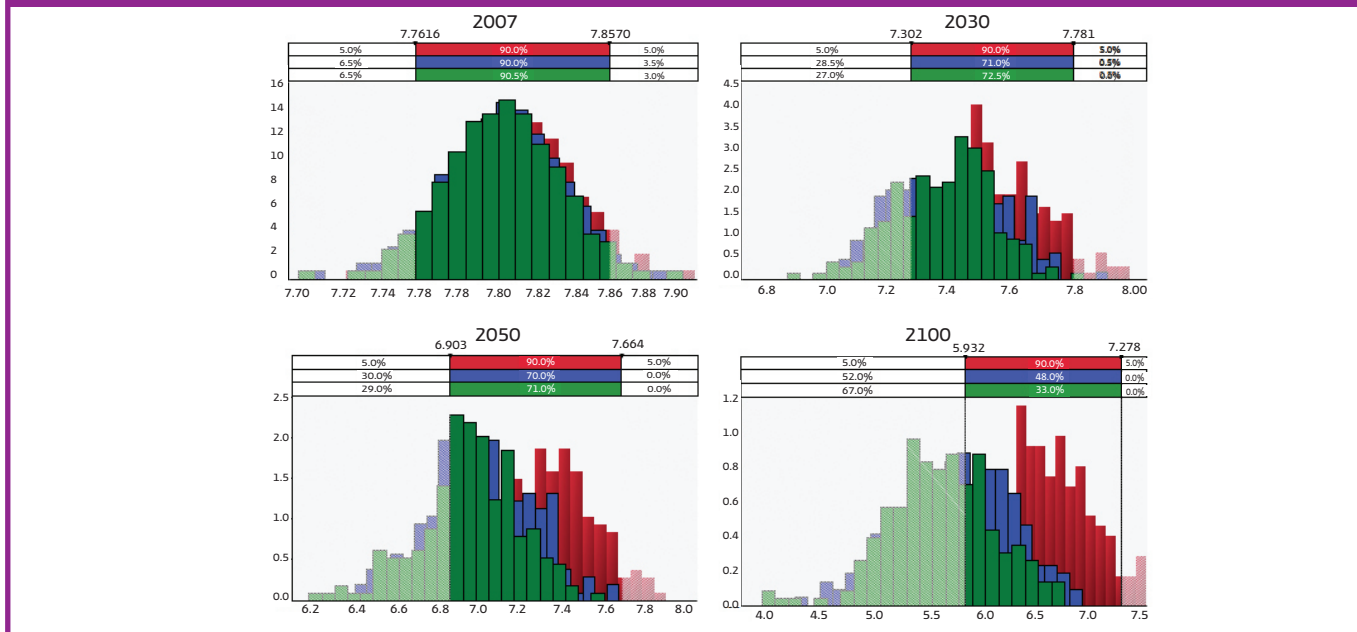


**Gráfica 60. Análisis de riesgo de los rendimientos del Frijol con los diferentes escenarios de cambio climático**



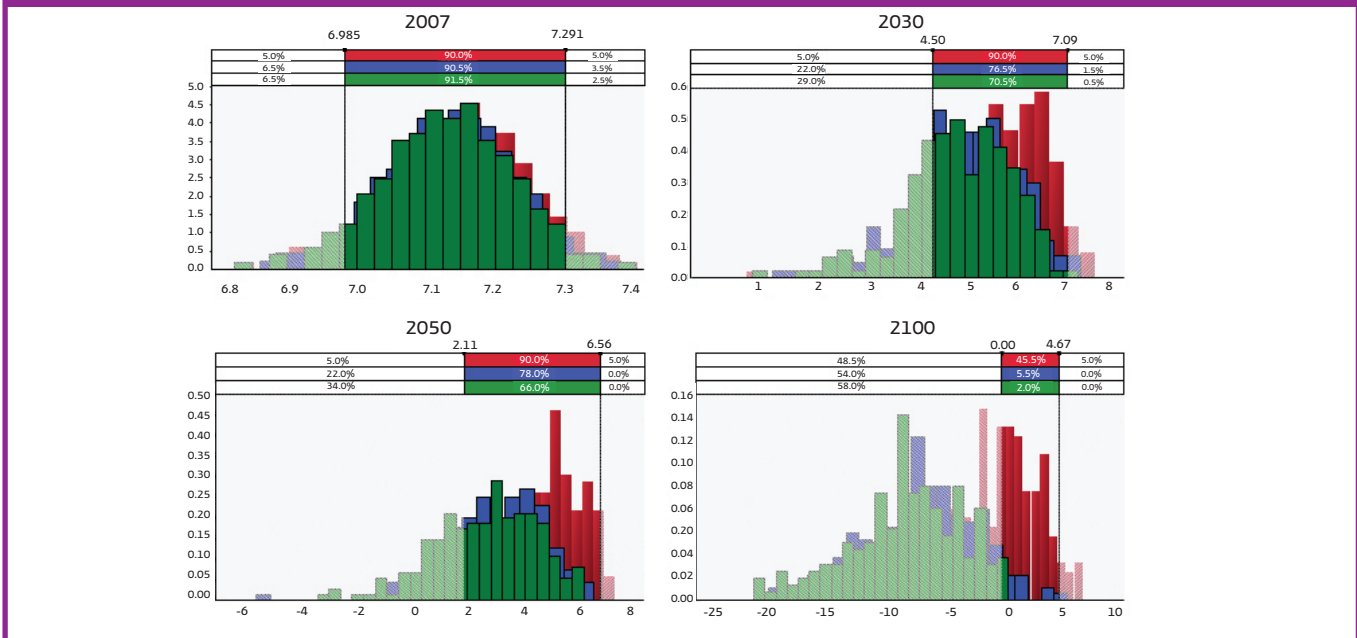
Nota: La distribución de color rojo corresponde al escenario climático B1, la distribución azul es del escenario A1B y la distribución verde al escenario A2 del IPCC. El valor de los rendimientos esta en toneladas por hectárea. Las simulaciones fueron hechas con el modelo de los rendimientos del maíz. Simulaciones de Monte Carlo con 200 iteraciones.

**Gráfica 61. Análisis de riesgo de los rendimientos del trigo con los diferentes escenarios de cambio climático**



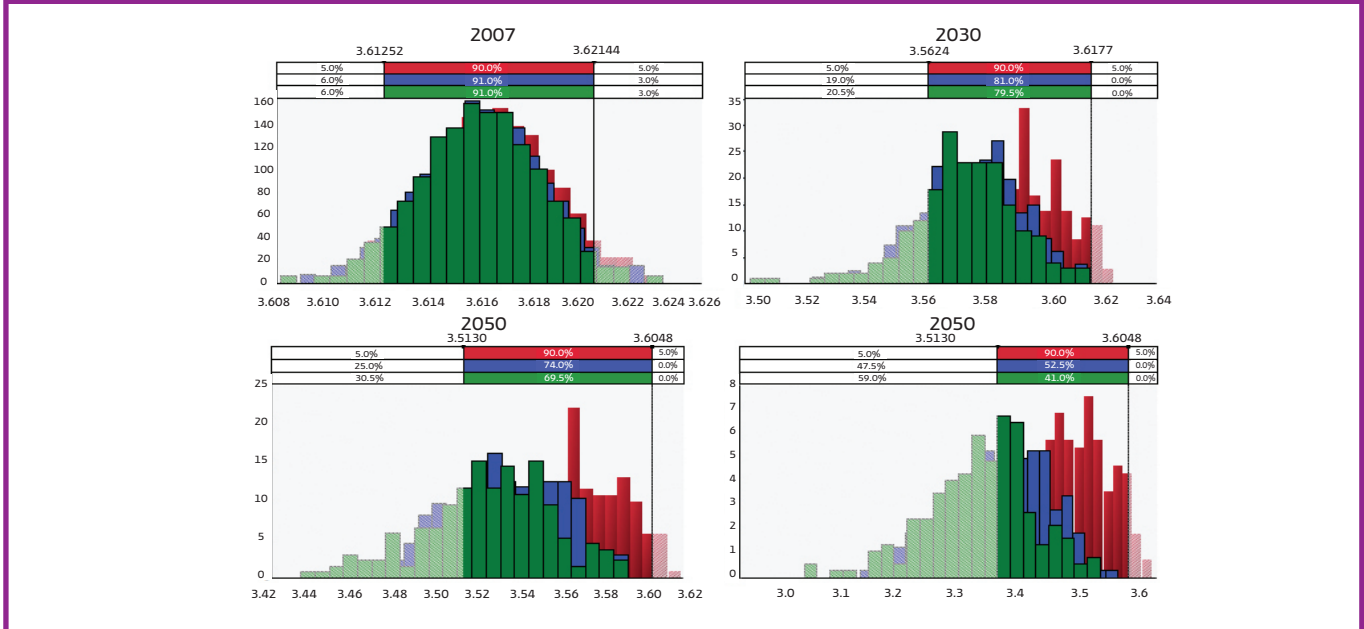
Nota: La distribución de color rojo corresponde al escenario climático B1, la distribución azul es del escenario A1B y la distribución verde al escenario A2 del IPCC. El valor de los rendimientos esta en toneladas por hectárea. Las simulaciones fueron hechas con el modelo de los rendimientos del frijol. Simulaciones de Monte Carlo con 200 iteraciones.

**Gráfica 62. Análisis de riesgo de los rendimientos del sorgo con los diferentes escenarios de cambio climático**



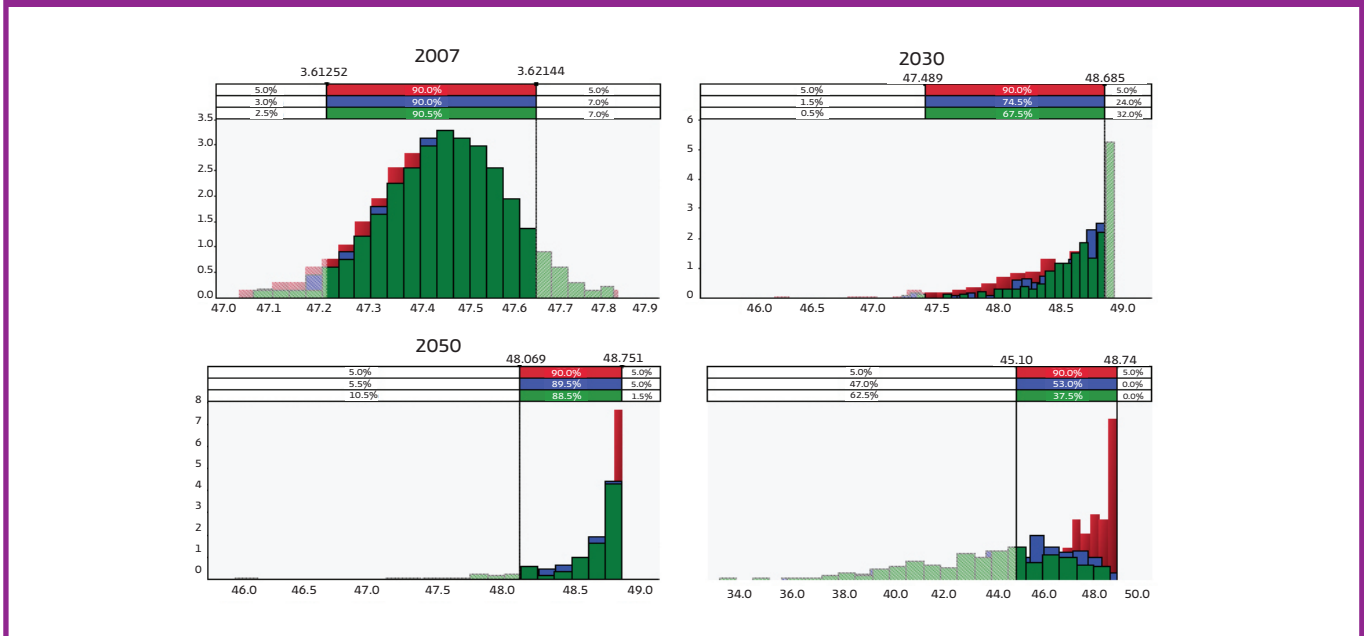


**Gráfica 63. Análisis de riesgo de los rendimientos de la soja con los diferentes escenarios de cambio climático**



Nota: La distribución de color roja corresponde al escenario climático B1, la distribución azul es del escenario A1B y la distribución verde al escenario A2 del IPCC. El valor de los rendimientos esta en toneladas por hectárea. Las simulaciones fueron hechas con el modelo del los rendimientos del trigo. Simulación de Monte Carlo con 200 iteraciones.

**Gráfica 64. Análisis de riesgo de los rendimientos de la sandía con los diferentes escenarios de cambio climático**



Nota: La distribución de color rojo corresponde al escenario climático B1, la distribución azul es del escenario A1B y la distribución verde al escenario A2 del IPCC. El valor de los rendimientos esta en toneladas por hectárea. Las simulaciones fueron hechas con el modelo del los rendimientos del sorgo. Simulación de Monte Carlo con 200 iteraciones.

## 5. EL MODELO TIPO RICARDIANO

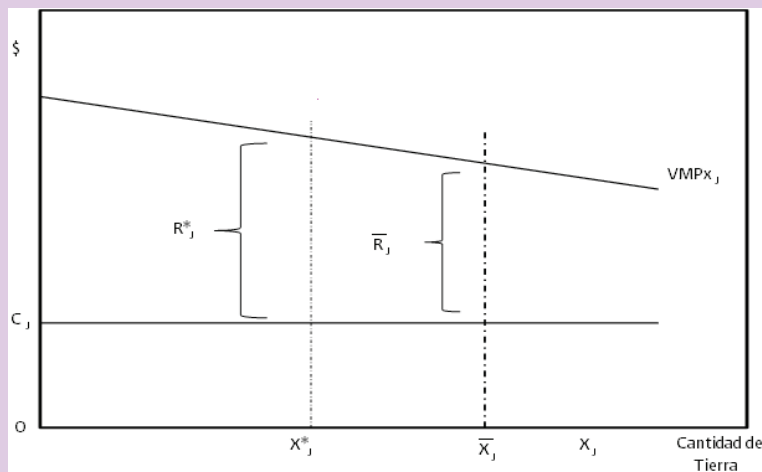
La estimación de los impactos climáticos sobre la agricultura representa una elevada complejidad. Por ejemplo, estos impactos climáticos deben de identificarse incluyendo las tendencias económicas actuales y los procesos de adaptación en curso ante estas mismas eventualidades climáticas y los efectos adicionales tales como calidad del suelo. Por ello, las estimaciones de las funciones de producción en el sector agropecuario han sido criticadas en la medida en que no corrigen por la presencia de ciertos sesgos potenciales asociados a los ingresos y al valor de la tierra (Mendelsohn *et al.*, 1994 y Deschenes y Greenstone, 2006). En este sentido, se busca construir un escenario más realista y eliminar lo que se conoce como el caso del “granjero miope” (*dumb farmer scenario*) (Deschenes y Greenstone, 2006) donde los agentes no realizan procesos de adaptación ante los cambios climáticos y los ajustes de precios.

En este contexto, el modelo Ricardiano tiene como hipótesis básica que el valor de la tierra se puede derivar del valor de venta de la tierra que se asocia a su contribución a la productividad. De este modo, las rentas de la tierra reflejan su productividad. Así, este modelo determina la productividad neta agrícola como función de variables climáticas, económicas y de calidad del suelo con base en información de series de sección cruzada. En este sentido, estos modelos de tipo Ricardianos permiten estimar el impacto del cambio climático en la productividad agrícola (Mendelsohn *et al.*, 1994 y 1999) a través de estimar los impactos climáticos y su sensibilidad sobre las ganancias para luego evaluar los costos económicos pronosticando el clima. Los modelos de tipo Ricardianos presentan sin embargo el problema de que no incluyen las posibles modificaciones en los precios y por lo tanto pueden ofrecer un sesgo en las estimaciones del bienestar (Cline, 1996 y Mendelsohn *et al.*, 1994) ya que el supuesto de precios fijos implica normalmente sobreestimar los beneficios y reduce los impactos negativos (Kabubo-Mariara y Karanja, 2007 y Maddison, Manley y Kurukulasuriya, 2007). Asimismo estas estimaciones consideran sólo los efectos temporales y no incluye los impactos permanentes que pueden corresponder más a los impactos del cambio climático.

La propuesta Ricardiana para el análisis de la renta considera que la productividad de la tierra disminuye lo que se traduce en un menor producto marginal ( $VMPx_j$ ).

Utiliza, por ejemplo, la distancia al mercado como una medida de costos de los productos agrícolas en un lugar específico. De este modo, diferentes valores de renta implican una heterogeneidad en el espacio, producción, obtención de costos y en el riesgo. De este modo, la tierra tiene un precio de oferta constante  $c_j$  pero una mayor calidad de tierra tendrá una renta  $R_j^*$  mientras que cuando se presenta una menor productividad entonces la renta se ubicará en  $R_j$ .

**Renta Ricardiana para diferentes calidades de tierra**



De este modo, la hipótesis del modelo Ricardiano se especifica de acuerdo a la ecuación (4) considerando que la ganancia es igual al ingreso menos los costos (Deschenes y Greenstone, 2006 y Kurukulasuriya y Rosenthal, 2003). Así, la renta de la tierra es una función de los precios ( $p$ ), la producción ( $q$ ) y los costos totales ( $c$ ), en donde los precios y los costos totales están en función de la producción y estos a su vez dependen de variables como el clima ( $w$ ) debido a que la temperatura y la precipitación tienen efectos directos.

$$(4) \quad \pi = p(q(w))q(w) - c(q(w))$$

La hipótesis del modelo Ricardiano se puede especificar en forma operacional (Kabubo-Mariara y Karanja, 2007) como:

$$(5) \quad R = \sum_{i=1}^n P_i Q_i(X, CLIM, Z, G) - \sum_{x=1}^k P_x X$$

Donde  $R_i$  es ingreso neto por hectárea,  $P_i$  es el precio del cultivo por hectárea,  $Q_i$  es el producto del cultivo,  $X_i$  es el vector de insumos,  $CLIM_i$  es un vector de variables climáticas,  $Z_i$  es el vector de variables de suelo,  $G_i$  es un vector de variables económicas y  $P_x$  es un vector de precios de los insumos. La forma reducida de la ecuación (6) que incluye sólo variables exógenas como determinantes se representa como (Kabubo-Mariara y Karanja, 2007):

$$(6) \quad R_i = \beta_0 + \beta_1 CLIM_i + \beta_2 CLIM_i^2 + \beta_3 Z_i + \beta_4 G_i + \mu_i$$

La estimación de la ecuación (6) utilizando variables de sección cruzada (Wooldridge, 2001) permite entonces identificar a la variable del rendimiento por Estado y a los impactos climáticos también por Estado (Deschenes y Greenstone, 2006). De este modo, se condiciona las ganancias por Estado. Los parámetros son entonces identificados por las desviaciones climáticas por Estado con respecto al promedio nacional para después ajustar por *shocks* comunes a todos los Estados. Esta variación puede ser ortogonal a los determinantes no observados de las ganancias agrícolas y ofrece por tanto una solución parcial al problema de las variables omitidas. Asimismo, para identificar los impactos en los precios y los procesos de adaptación se estima la ecuación (6) incluyendo a los rendimientos. Así, se busca modelar a la variable de rendimiento por hectárea con respecto a las variables climáticas y de control. Ello sugiere que, por ejemplo, una caída de las ganancias puede compensarse parcialmente con un aumento de los precios asociado a algún proceso de adaptación. Las variables al cuadrado permiten incorporar este impacto no-lineal de los efectos climáticos. Es posible además ponderar a la variable endógena por la raíz cuadrada de las hectáreas por firma o por la raíz cuadrada del porcentaje cultivado para normalizar los resultados (Deschenes y Greenstone, 2006). Estas estimaciones no incluyen formalmente los procesos de adaptación en la medida en que no incorporan cambios en los tipos de cultivos que suceden de un año a otro (Deschenes y Greenstone, 2006).

Existe una gran cantidad de evidencia disponible a nivel internacional que muestra que los impactos climáticos sobre el valor de la tierra son inciertos (Adams, 1989, Mendelsohn, *et al.*, 1994 y 1999, Kelly *et al.*, 2005). Por ejemplo, Fleischer *et al.* (2008) encuentra, con un modelo Ricardiano, que el cambio climático beneficia a la agricultura en Israel lo mismo que para Estados Unidos de Norteamérica donde las ganancias aumentan en aproximadamente 3% (Deschenes y Greenstone, 2006). Asimismo, con modelos Ricardianos, se observan impactos significativos pero muy diversos para varios países africanos. Así, principalmente se muestran efectos negativos para países como Sudáfrica, Camerún, Ghana, Níger, Zambia y Etiopía, así como efectos positivos en los países de Kenya y Senegal (Maddison, Manley y Kurukulasuriya, 2007). También se han realizado otros estudios similares utilizando el modelo Ricardiano como el caso de Mendelsohn *et al.* (1994) para Estados Unidos de Norteamérica donde los términos cuadráticos de las variables del clima son estadísticamente significativas obteniendo una relación no lineal entre el cambio climático y la agricultura. Por otro lado, Mendelsohn y Dinar (2003) indican que no necesariamente la temperatura y la precipitación son buenos indicadores de la productividad agrícola ya que también es importante el impacto de la disponibilidad del

agua en la agricultura por lo que la irrigación de la tierra puede contrarrestar los impactos del clima. Maddison (2000) también estima un modelo Ricardiano para Inglaterra y Gales donde se observa que la relevancia del número de días con heladas y que el precio por hectárea de la tierra depende significativamente del tamaño de la parcela. Para el caso de Canadá los resultados del modelo Ricardiano indican resultados favorables ante el calentamiento global en relación con la agricultura tomando en cuenta variables como la latitud, la densidad de población y otras variables climáticas, aunque no presenta detalladamente los grados que favorecerían a la producción agrícola (Reinsborough, 2003). También en la India se han realizado estudios (Sanghi, *et al.*, 1998) que determinan que existe un impacto negativo del cambio climático en la productividad agrícola. Los efectos de las variables climáticas sobre la producción agrícola y sobre la renta son representados en los casos de Sri Lanka (Kurukulasuriya y Ajwad, 2004) donde la temperatura tiene un impacto positivo y la precipitación un impacto negativo, así como la relevancia de incluir en sus estimaciones variables como la tenencia de la tierra y la educación del jefe del hogar.

Asimismo, Tol (2002) evalúa los impactos del cambio climático en la agricultura, la silvicultura y otros aspectos del bienestar humano utilizando un GCM (Modelo de Circulación Global), basándose, para ello, en escenarios de cambio climático tomando en cuenta diversos países, y encuentra que, ante el impacto de un grado centígrado promedio de aumento en la temperatura global, el resultado sería una variación positiva en países de la OCDE, en China y países del Medio Oriente y una variación negativa en los restantes países. Finalmente Molua (2002) realiza un análisis en Camerún donde encuentra que la precipitación tiene un papel muy importante en la producción de cultivos lo que favorece al aumento de los rendimientos agrícolas.

El análisis para el caso mexicano se realizó sobre los diferentes rendimientos de algunos de los cultivos más significativos como son el maíz, el frijol, el sorgo y el trigo, usando datos de sección cruzada y tomando en cuenta las 32 entidades federativas del país (Cuadro 21). La base de datos incluye los rendimientos de los cultivos mencionados (toneladas por hectáreas), como variables climáticas se utilizaron la temperatura máxima, la temperatura máxima al cuadrado y la precipitación, además como variable económica se utilizó el producto *per cápita* y como variable de suelo el porcentaje de la superficie agrícola regada de cada entidad para el 2006 con base en la ecuación (6). Las variables explicativas son entonces la temperatura máxima ( $tm_t$ ), la temperatura máxima al cuadrado ( $tm^2_t$ ), la precipitación ( $pr_t$ ), el porcentaje de la superficie agrícola regada ( $psr_t$ ) y el PIB *per cápita* ( $ypc_t$ ). Los resultados de las estimaciones presentan una buena bondad de ajuste entre las variables como lo indica el coeficiente de determinación ( $R^2$ ). Se muestra además que para el caso del rendimiento del maíz los variables son significativas teniendo efectos positivos tanto en la temperatura, el cuadrado de la temperatura, así como en la precipitación, asimismo se observa un efecto importante de la superficie de riego, similar a Mendelsohn y Dinar (2003) en donde la disponibilidad de agua juega un papel muy importante. Es importante señalar que para este caso el producto *per cápita* no fue estadísticamente significativo.

## CUADRO 21. MODELOS DE RENDIMIENTOS DEL MAÍZ, FRIJOL, SORGO Y TRIGO

Variable	Modelo maíz ( $rma_t$ )	Modelo frijol ( $rfr_t$ )	Modelo sorgo ( $rso_t$ )	Modelo trigo ( $rtr_t$ )
$tm_t$	0.235 (28.183)	0.058 (3.106)	0.446 (5.041)	0.409 (8.265)
$Tm^2_t$	-0.005 (-23.215)	-0.001 (-2.287)	-0.009 (-3.081)	-0.013 (-6.821)
$pr_t$	0.002 (27.903)			
$ypc_t$		0.060 (5.361)	0.011 (1.968)	0.244 (3.822)
$psr_t$	0.248 (43.362)	0.011 (2.085)	0.037 (3.611)	0.023 (1.919)
$R^2$	0.996	0.995	0.996	0.996

Notas: Los valores entre paréntesis indican los estadísticos t-Student.  
Año de estimación: 2006

Para los siguientes tres cultivos (el frijol, el sorgo y el trigo) sus rendimientos indican que existe una dependencia importante y significativa de la temperatura, de la temperatura al cuadrado, del producto *per cápita* y del porcentaje de superficie agrícola de riego mientras que la producción y los rendimientos no dependen en gran medida de la precipitación lo que contrasta con la importancia de la superficie regada para aumentar el rendimiento (Mendelsohn *et al.*, 1994 y Mendelsohn y Dinar, 1999). Así, en general se observa que la temperatura es el principal factor climático para determinar la trayectoria de rendimientos en el futuro bajo el supuesto de la opción de poder aumentar la superficie de tierra irrigada.

Considerando los efectos que se encontraron en los modelos de sección cruzada para los rendimientos de los cultivos se realizaron entonces diversas estimaciones tomando en cuenta el crecimiento del producto *per cápita*, la superficie de riego, la precipitación y, se utilizaron los pronósticos de los escenarios climáticos de temperatura de los diversos Estados para calcular las variaciones de los rendimientos, así como su porcentaje de pérdida total para el 2050 y el 2100. Los principales resultados, sintetizados en el Cuadro 22, muestran que la pérdida de rendimientos por tipo de cultivo al 2100 puede llegar aproximadamente al 33%.

## CUADRO 22. ESTIMACIONES DE LOS RENDIMIENTOS A NIVEL NACIONAL AL 2050

Producto	Variación de los rendimientos			Porcentaje de variación de los rendimientos		
	Modelo A1B	Modelo B1	Modelo A2	Modelo A1B	Modelo B1	Modelo A2
Maíz	-0.847	-0.995	-0.912	-13.624	-16.002	-14.668
Frijol	3.608	3.460	3.543	204.976	196.580	201.290
Sorgo	-2.816	-2.963	-2.883	-43.347	-45.607	-44.389
Trigo	-1.017	-1.163	-1.082	-22.160	-25.347	-23.575

## ESTIMACIONES DE LOS RENDIMIENTOS A NIVEL NACIONAL AL 2100

Producto	Variación de los rendimientos			Porcentaje de variación de los rendimientos		
	Modelo A1B	Modelo B1	Modelo A2	Modelo A1B	Modelo B1	Modelo A2
Maíz	-1.368	-1.375	-1.363	-22.013	-22.127	-21.933
Frijol	3.087	3.080	3.092	175.357	174.953	175.639
Sorgo	-3.343	-3.351	-3.339	-51.470	-51.580	-51.397
Trigo	-1.541	-1.548	-1.535	-33.573	-33.731	-33.448

La estimación del modelo Ricardiano utilizando como variable dependiente a la renta de la tierra por estado, que representa las ganancias agrícolas, y como variables explicativas a la temperatura máxima ( $t_m$ ), a la temperatura máxima al cuadrado ( $t_m^2$ ), a la precipitación ( $pr$ ), al porcentaje de la superficie agrícola regada ( $psr$ ) y al PIB *per cápita* ( $ppc$ ) se sintetiza en el Cuadro 23. Los resultados muestran que el impacto de la temperatura se incrementa hasta una temperatura óptima y después irá disminuyendo. Por su parte, la precipitación, la superficie de riego y el PIB *per cápita* tienen un impacto positivo en el valor de la tierra.

## CUADRO 23. MODELOS DE RENTA DE LA TIERRA DE USO AGRÍCOLA

Variable	Modelo renta de la tierra ( $rsag_t$ )
$tm_t$	0.711 (3.961)
$Tm^2_t$	-0.019 (-5.672)
$pr_t$	0.005 (1.208)
$psr_t$	0.089 (2.182)
$ypc_t$	0.247 (2.820)
$R^2$	0.967

Notas: Los valores entre paréntesis indican los estadísticos t-student  
Año de estimación: 2006

Los escenarios climáticos, sintetizados en el Cuadro 24 muestran que el promedio de la renta por hectárea va a disminuir entre 170 y 214 pesos por hectárea para el año 2050 en términos reales, lo que representa una caída de entre 12% y 16% dependiendo del escenario climático. Estas caídas de la renta de la tierra se acentúan para el 2100 alcanzando aproximadamente el 24% (Cuadro 25).

## CUADRO 24. ESTIMACIONES DE LA RENTA PARA USO DE SUELO AGRÍCOLA A NIVEL NACIONAL AL 2050. PRECIO DE LA RENTA PROMEDIO (\$/HA)

	Variación de la renta de uso de suelo			Porcentaje de variación de la renta de uso de suelo		
	Modelo A1B	Modelo B1	Modelo A2	Modelo A1B	Modelo B1	Modelo A2
<b>Renta de la tierra nacional</b>	-170.21	-214.83	-186.79	-12.84	-16.20	-14.09

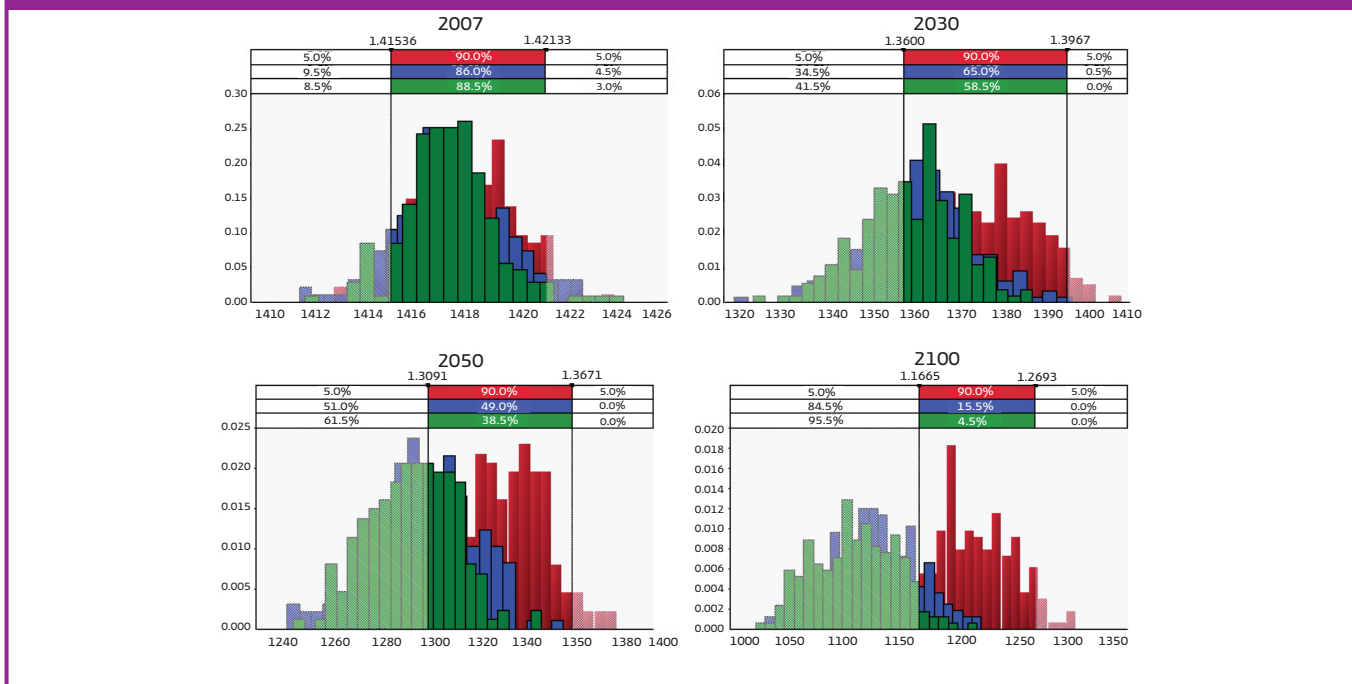
## CUADRO 25. ESTIMACIONES DE LA RENTA PARA USO DE SUELO AGRÍCOLA A NIVEL NACIONAL AL 2100. PRECIO DE LA RENTA PROMEDIO (\$/HA)

	Variación de la renta de uso de suelo			Porcentaje de variación de la renta de uso de suelo		
	Modelo A1B	Modelo B1	Modelo A2	Modelo A1B	Modelo B1	Modelo A2
<b>Renta de la tierra nacional</b>	-325.08	-327.08	-323.48	-24.52	-24.67	-24.40

Los procesos de adaptación en el sector agropecuario resultan entonces fundamentales para determinar el impacto neto del cambio climático. Estos procesos de adaptación incluyen cambio de variedades, tipos y formas de cultivo, días de siembra, combinación de cosechas, irrigación, alternativas de semillas, mercados de seguros, fertilizantes y extensión sembrada de la agricultura o cambios de actividad (pecuaria por ejemplo). En general se observa que la diversificación es el proceso de adaptación más difundido (Kabubo-Mariara y Karanja, 2007) acompañado de la tecnología o la infraestructura. Sin embargo, estos procesos de adaptación dependen de límites de crédito, información y pobreza lo que ponen en muchas ocasiones obstáculos difíciles de sortear ya que la diversificación es costosa (Kabubo-Mariara y Karanja, 2007). Debe entonces ponderarse los costos y beneficios de la adaptación considerando que los agricultores tomarán nuevos cultivos para los nuevos climas.

La Gráfica 65 muestra el análisis de riesgo de la renta de la tierra ante los escenarios de cambio climático. En los primeros años no existe una gran diferencia entre los escenarios de clima, pero a partir de 2030 existe un mayor riesgo en los escenarios más extremos (A2 y A1B).

**Gráfica 65 Análisis de riesgo de la renta de la tierra con diferentes escenarios de cambios climáticos**



Nota: La distribución de color rojo corresponde al escenario climático B1, la distribución azul es del escenario A1B y la distribución verde al escenario A2 del IPCC. La renta de la tierra está en pesos por hectárea. Y estas simulaciones fueron hechas con el modelo de la renta de tierra. Simulaciones de Monte Carlo con 200 iteraciones.

## 6. MODELOS DE RIESGO EN LAS ACTIVIDADES AGROPECUARIAS

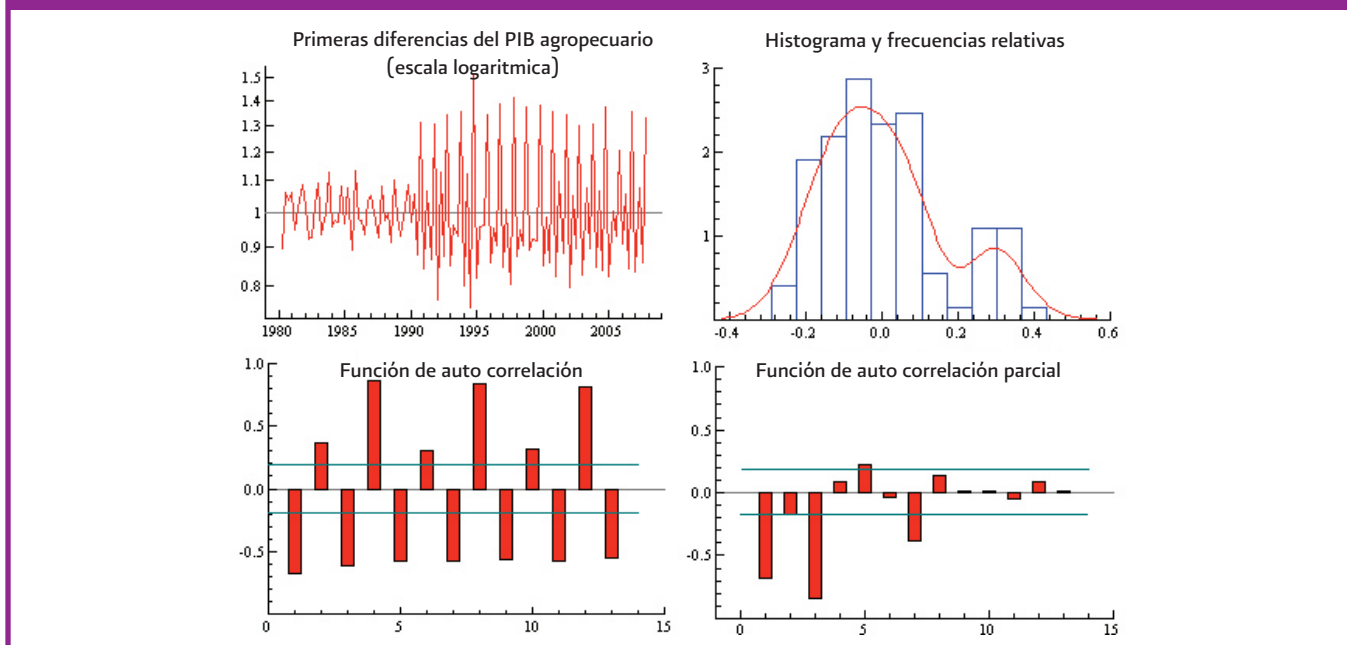
La producción y en general el conjunto de las actividades agropecuarias muestran un comportamiento estocástico que se traduce en oscilaciones importantes a lo largo del tiempo lo que implica un nivel de riesgo e incertidumbre. En general, los agentes económicos no toman un riesgo a menos que esperen un beneficio monetario y se espera que la expectativa de un mayor beneficio se asocie a un riesgo más elevado (Cuthbertson, 1996). De este modo, el riesgo resulta fundamental para determinar las formas de ajuste de los agentes económicos. La evidencia disponible a nivel internacional muestra que en general los agentes económicos ajustan sus comportamientos a cambios en el nivel de riesgo (Daly, 2008). Ello se traduce en ajustes en el comportamiento de los agentes económicos a través de la instrumentación de diversos comportamientos defensivos y de aversión al riesgo (Just, 1974 y Antle, 1987, Pope y Just, 1991 y Chavas y Holt, 1990).

El PIB agropecuario puede describirse como un proceso estocástico estacionario alrededor de una tendencia determinística y una constante, es decir sigue una trayectoria ascendente con fluctuaciones autocorrelacionadas alrededor de su tendencia o en todo caso se puede considerar como una serie no estacionaria de no incluirse la tendencia. Dichas fluctuaciones están asociadas a factores socioeconómicos y eventos climáticos y geográficos e incluso impactos relacionados con las políticas públicas instrumentadas (Just, 1974 y Antle, 1987, Pope y Just, 1991).



La evidencia de un mayor nivel de riesgo en el sector agropecuario se observa en la Gráfica 66 atendiendo a que la tasa de crecimiento de la producción agropecuaria se ha hecho más volátil en los últimos años (Gallagher, 1986 y 1987, Day, 1965, Buccolla, 1986) y donde se observa, además, que su comportamiento puede no seguir una distribución normal sino asimétrica (Swinton y King, 1991) y que existe un posible comportamiento heteroscedástico de la varianza (Ramírez, 1997 y AGROASEMEX, 2008).

**Gráfica 66. Comportamiento del IPB agropecuario 1980-2007**



Así, la volatilidad en las actividades agropecuarias muestra la posible presencia de este tipo de riesgo variable en el tiempo y que debe incorporarse en los procesos de ajuste de los agentes económicos y por lo tanto a los costos del cambio climático.

## 6.1. MODELO DE VOLATILIDAD ASIMÉTRICA PARA EL PRODUCTO

La volatilidad del producto se puede especificar a través de modelar la varianza condicional y manteniendo constante la varianza no condicional (Paterson, 2000 y Alexander, 2005) a través de modelos de tipo ARCH (Engle, 1982). Para ello se estimó un modelo donde el PIB del sector agropecuario se especifica como una función de las variaciones del PIB agropecuario que son función de las variaciones del ganado, del empleo, de la superficie cultivada y de los fertilizantes.

$$(7) \quad \Delta PIBA_t = f(\Delta sc_t, \Delta fer_t, \Delta ema_t, \Delta gan_t)$$

Donde  $PIBA_t$  representa el Producto Interno Bruto Agropecuario,  $sc_t$  es la superficie cultivada,  $fer_t$  son los fertilizantes,  $ema_t$  es el empleo en el sector agropecuario y  $gan_t$  es el ganado. La base de datos consiste en series anuales de 1980 a 2006. Las series en minúsculas representan el logaritmo natural de las series. El modelo utilizado corresponde a un TGARCH o Threshold GARCH (Glosten, *et al.*, 1993) que permiten incluir en la especificación de un efecto asimétrico:

$$(8) \quad h_t = \alpha_0 + \sum_{i=1}^p \alpha_i \varepsilon_{t-i}^2 + \sum_{i=1}^q \beta_i h_{t-i} + \sum_{k=1}^r \gamma_k \varepsilon_{t-k}^2 I_{t-k}$$

Donde  $I_{t-1} = 1$  si  $\varepsilon_t < 0$ ,  $I_{t-1} = 0$



Este tipo de modelo distingue en la especificación la presencia de *shocks* positivos o negativos dependiendo del signo del término de error. Esto es, permite incluir el “*leverage effect*” o efecto asimétrico (Black, 1976 y Nelson, 1990) que es el caso donde una caída inesperada en el precio o rendimiento (malas noticias) incrementa la volatilidad en una mayor proporción que, un aumento inesperado en el precio o en el rendimiento (buenas noticias) de la misma proporción.

Ello se identifica como buenas o malas noticias, dependiendo del signo positivo o negativo del coeficiente, y donde estos efectos son diferentes sobre la varianza condicional. Así, las buenas noticias tienen un impacto a través de  $\alpha_i$  y las malas noticias tienen un efecto a través de  $\alpha_{i+}$ . En el caso en que  $\gamma_{i+} > 0$  ello indica que las malas noticias incrementan la volatilidad en mayor medida que las buenas noticias y se dice entonces que existe un “*leverage effect*”<sup>22</sup> o un efecto asimétrico (Engle, Ng, y Rothschild, 1990).

La estimación de un modelo TGARCH-M se presentan en el Cuadro 26. Los resultados obtenidos confirman la presencia de un riesgo variable y son, además, consistentes con otros estudios para el sector agropecuario como Just (1974) o Pope y Just (1991). En este sentido, resulta relevante considerar las actitudes de los agricultores y sus sensibilidades de respuesta ante el riesgo (Antle, 1987 y Chavas y Holt, 1990) que sugiere que los agentes económicos en el sector agropecuario son adversos al riesgo (Binswanger, 1980). En la especificación del modelo TGARCH-M se incluye un proceso Threshold-GARCH, que incluye una variable “dummy” que señala los errores negativos de la media condicional y se incluyen en la varianza condicional. De este modo, existe un efecto asimétrico entre la volatilidad de la producción y las malas noticias sobre la producción agregada. Los resultados obtenidos indican que estas variables tienen un impacto positivo en las variaciones del producto agropecuario. Existe entonces un efecto ARCH que es negativo y estadísticamente significativo, es decir una mayor volatilidad en las tasas de crecimiento en periodos anteriores tiende a reducir la varianza en el periodo actual. En esta segunda especificación, que incluye un conjunto de variables explicativas, se identifica un “*leverage effect*”<sup>22</sup> en el sentido de que las malas noticias incrementan la volatilidad. Es decir, contracciones en las actividades agropecuarias inducen un aumento en la dispersión de las tasas de crecimiento y por tanto generan un mayor nivel de riesgo. Ello desde luego impacta al comportamiento de los productores agropecuarios.

## CUADRO 26. ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO TGARCH (INCLUYE VARIABLES EXPLICATIVAS EN LA MEDIA CONDICIONAL)

<b>Modelo</b> $\Delta PIBA_t = \beta_0 + \beta_1 \Delta EMA_{t-1} + \beta_2 \Delta SC + \beta_3 FER_{t-1} + \beta_4 \Delta GAN + \delta \sigma_{t-1} + e_t$ $\sigma_t^2 = \alpha_0 + \alpha_1 \sigma_{t-1}^2 + \phi e_{t-1}^2 + \gamma e_{t-1}^2 \Gamma_{t-1} + u_t$									
$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$	$\delta$	$\alpha_0$	$\alpha_1$	$\phi$	$\gamma$
-0.038	0.557	0.069	0.028	0.079	8.356	0.003	0.589	-0.196	0.663
(-17.2)	(11.207)	(3.278)	(4.943)	(3.295)	(22.456)	(364.878)	(18.723)	(-1.58)	(3.023)
[0.000]	[0.000]	[0.001]	[0.000]	[0.001]	[0.000]	[0.000]	[0.000]	[0.114]	[0.003]

Notas: Las letras en minúsculas representan el logaritmo natural de las series. Los valores entre paréntesis indican la significancia estadística de los estimadores.  
 Período: 1980–2007.

El sector agropecuario muestra entonces un comportamiento estocástico con oscilaciones en torno a una tendencia a lo largo del tiempo (Antle 1987, Biswanger, 1980, Chavas y Holt, 1990, Just y Pope, 2003). Asimismo, se observa que las actividades agropecuarias tienen tendencia, muestran persistencia y además existe alguna variabilidad de la serie a lo largo del tiempo, que la volatilidad aparece en grupos o *clusters* y que es asimétrica rechazando la hipótesis de normalidad (Del Ángel, Galindo y Torres, 2007).

<sup>22</sup> En este caso particular se refiere en el caso en que una empresa que cotiza en bolsa de valores, reduce el precio de sus acciones o el valor de la empresa se genera un incremento en su relación de deuda a activos.

Los resultados obtenidos muestran que existe entonces un efecto positivo de la inestabilidad de la producción, tanto en nivel como en tasas de crecimiento, en el valor esperado de la producción; de esta forma la producción depende de las expectativas de riesgo en la producción agropecuaria.

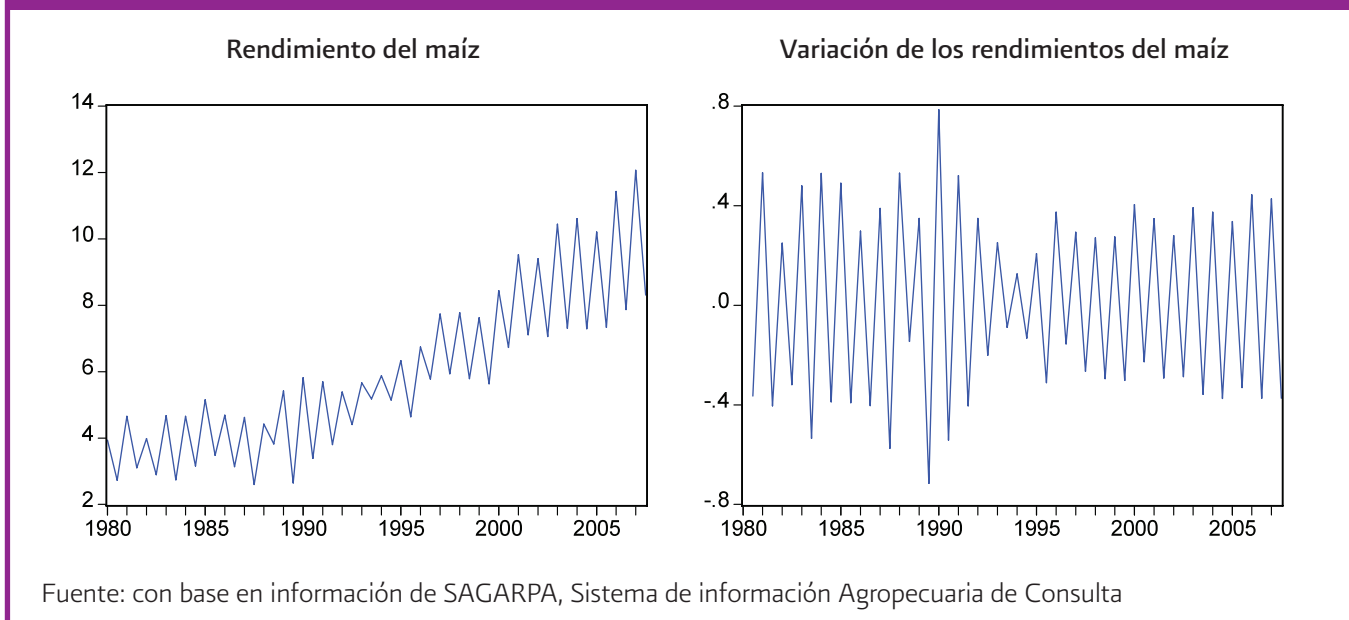
Así, la varianza condicional está determinada por la varianza del periodo anterior de modo que existe una volatilidad correlacionada del riesgo en cada período. La evidencia presentada en este apartado muestra entonces que el comportamiento del riesgo es relativamente asimétrico con un sesgo hacia los eventos negativos. Ello afecta a los productores agropecuarios.

El conjunto de esta evidencia sugiere que existe un componente de riesgo importante en las actividades agropecuarias que influye significativamente en la forma en que los agentes actúan en el sector. Por ejemplo, los productores rurales de más bajos ingresos que tienen menos posibilidades de adaptarse a *shocks* negativos reciben no sólo efectos adversos sobre sus niveles de ingreso sino que también se daña su vulnerabilidad al riesgo (Kurosaki, 2006) y su capacidad de recuperación económica. De este modo, los productores agropecuarios rurales no responden exclusivamente a los incentivos directos de precios y consideran también su exposición al riesgo. Ello explica los procesos de diversificación de la producción que no optimizan el beneficio pero reducen el riesgo. Lo cual debe ser considerado al instrumentar cualquier política de apoyo al sector.

## 6.2. VOLATILIDAD EN LOS RENDIMIENTOS AGRÍCOLAS

La volatilidad en el sector agropecuario puede también observarse al analizar la evolución de los rendimientos. En efecto, la evolución de los rendimientos promedio y sus variaciones se presentan en la Gráfica 67 considerando los ciclos primavera-verano y otoño-invierno, de tal forma que las variaciones se refieren a los cambios en los rendimientos de un ciclo a otro. La trayectoria de los rendimientos muestra un comportamiento correlacionado con un aumento relativo de la volatilidad a partir de 1995.

**Gráfica 67. Rendimiento promedio del maíz ciclos primavera-verano y otoño-invierno 1980-2006 (Toneladas por hectárea, en superficie de riesgo)**



Fuente: con base en información de SAGARPA, Sistema de información Agropecuaria de Consulta

La presencia de esta volatilidad variable se observa al estimar un modelo de la media condicional de los rendimientos del maíz que se sintetiza en la ecuación (9). Esto es, los errores de la ecuación (9), no rechazan la hipótesis de normalidad y la ausencia de auto correlación serial en los errores; no obstante se rechaza la hipótesis nula de heteroscedasticidad atendiendo a la prueba ARCH y de las funciones de auto correlación (FAC) y de auto correlación parcial (FACP) sobre los errores al cuadrado (Gráfica 68).

$$(9) \quad \Delta rm_t = 0.054 - 0.967 * \Delta rm_{t-1} - 0.433 * \Delta rm_{t-2} - 0.438 * \Delta rm_{t-3}$$

(3.268)
(-7.503)
(-2.454)
(-3.444)

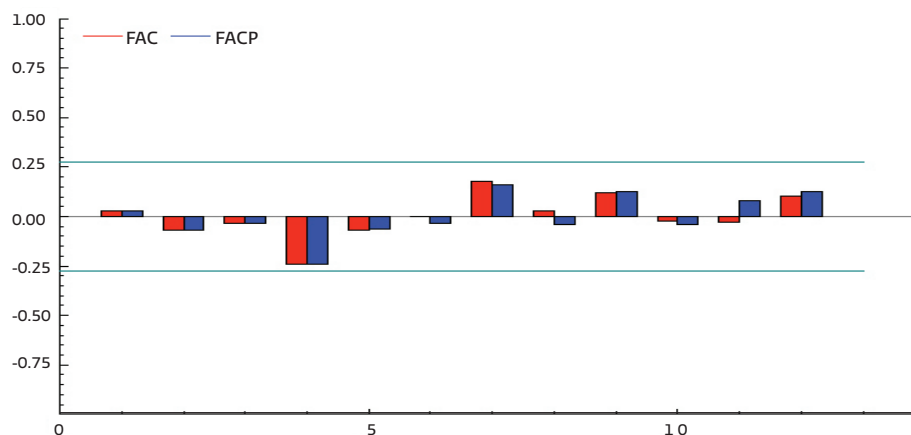
R<sup>2</sup> = 0.925

Normalidad JB= 2.291 (0.318)

Autocorrelación: LM(4): 1.366 (0.261)

Heteroscedasticidad: ARCH(4): 4.017 (0.007)

**Gráfica 68. Función de auto correlación y auto correlación parcial de los errores al cuadrado de los rendimientos del maíz**



Fuente: función de auto correlación y FACP-fundación de auto correlación parcial

La estimación de un modelo GARCH se reporta en la ecuación (10) y el correlograma de los residuales en el (Cuadro 27). Estos resultados muestran que existe un patrón sistemático en la volatilidad de los rendimientos de los cultivos de maíz que dependen de los "shocks" del ciclo anterior y del pronóstico de la varianza condicional. De esta forma las expectativas de riesgo en los rendimientos del maíz influyen positivamente en el riesgo actual.

$$(10) \quad h_t = 0.001 - 0.147 * e_{t-1}^2 + 0.371 * e_{t-2}^2 + 0.501 * h_{t-1}$$

(2.157)
(-1.931)
(2.705)
(6.361)

Heteroscedasticidad: ARCH (4): 0.958 (0.446)

Normalidad: JB = 2.373 (0.305)

Método de optimización: Marquard

Convergencia después de 57 iteraciones

## CUADRO 27. CORRELOGRAMA DE LOS RESIDUALES AL CUADRADO

	Número de Rezagos											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>FAC</b>	0.026	-0.072	-0.031	-0.23	-0.051	-0.008	0.201	0.055	0.143	-0.031	-0.055	0.059
<b>FACP</b>	0.026	-0.073	-0.027	-0.236	-0.047	-0.048	0.193	-0.012	0.173	-0.052	0.078	0.076
<b>Q-est</b>	0.0377	0.3325	0.387	3.4899	3.6426	3.6462	6.1737	6.3677	7.7089	7.7726	7.9817	8.2278
<b>prob</b>	0.846	0.847	0.943	0.479	0.602	0.724	0.52	0.606	0.564	0.651	0.715	0.767

Nota: FAC: Función de Autocorrelación, FACP: Función de Autocorrelación Parcial, Q-est: Estadístico de Ljun Box

El conjunto de ésta evidencia sugiere entonces que existe un componente de riesgo importante en las actividades agropecuarias que influye significativamente en la forma en que los agentes actúan en el sector.

## 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. El sector agropecuario contribuye de manera destacada con la provisión de insumos básicos a otros sectores y de alimentos para la población; asimismo, es una fuente de ingresos para un número importante de familias y agentes económicos y en muchas ocasiones representa una entrada adicional de divisas. Los determinantes de ésta actividad son múltiples e incluyen, por ejemplo, la tecnología aplicada, el tipo de semillas, los fertilizantes, la infraestructura de irrigación o el tipo de tierra; sin embargo, el clima es un factor más con una importancia creciente. En este sentido, el clima es un componente fundamental para determinar la producción, los rendimientos y los ingresos de los productores rurales.
2. Los resultados de los modelos estimados muestran que los ingresos y el bienestar de los productores rurales dependen del clima. Ello debe ponderarse con especial cuidado en climas extremos (Mendelsohn, 2003). Se observa además que no existen substitutos perfectos para el clima en la función de producción aunque existen posibles procesos de adaptación dentro de ciertos límites.
3. Los costos económicos estimados del cambio climático son ciertamente significativos. En efecto, los principales resultados indican que, para el modelo del tipo de función de producción y en el peor escenario climático (A2), los costos totales del sector agropecuario respecto al PIB al 2100 para los productos perennes es de 1.72%, con tasa de descuento del 4% y de 11.26% con tasa de descuento del 0.5%. Por su parte, los costos del índice de productos cíclicos oscila entre 0.02% y 0.21% del PIB al 2100 con tasas de 4% y 0.5% respectivamente. Destacan, en este contexto, las pérdidas potenciales en maíz y que, para la década 2050s, los costos totales son menores que hacia finales de siglo. Estos resultados muestran la presencia de una curva de costos no lineal pero creciente en el tiempo asociada a los cambios climáticos. De este modo, incluso ganancias temporales de corto plazo se erosionarán en el futuro. Por su parte, en el modelo de tipo Ricardiano se observa que la pérdida de rendimientos por tipo de cultivo al 2100 puede llegar al 33% y en renta de la tierra es de aproximadamente el 24%. Además existe evidencia de un aumento del riesgo en el sector agropecuario que modifica las conductas de los agentes económicos para administrar este riesgo creciente. A su vez, parecen existir costos en el sector pecuario. Debe sin embargo considerarse que estos costos no se sumaron directamente ya que sólo se presentan como preliminares y podrían implicar, en algunos casos una doble contabilidad.
4. La estimación de costos no considera simultáneamente los impactos de la temperatura y la precipitación. La combinación de estos dos elementos puede generar costos adicionales importantes.

5. Sin embargo, el conjunto de los resultados presentados indican que estos impactos dependen, crucialmente, del grado de adaptación (Stern, 2007). No obstante, existen diversos tipos de adaptación tales como cambio de uso de suelo, combinación de cultivos, desarrollo tecnológico, modificación de prácticas de cultivo y una mayor irrigación (Parry, *et al.*, 2005, IPCC, 2007). Así, se observa, por ejemplo, que Estados que han pasado la temperatura óptima para el cultivo del maíz no ha reducido sus rendimientos por su mejor adaptación a los procesos tecnológicos como Sinaloa, Sonora y Coahuila, sin embargo, siguen en riesgo ante los escenarios de cambio climático; por otro lado existen Estados que no se han adaptado a estos procesos. El conjunto de los resultados indican que los Estados del Norte (con excepción de Baja California) serán los más perjudicados aunque disponen de una importante capacidad de adaptación; mientras los Estados del centro y noreste tendrían mayores posibilidades de beneficiarse momentáneamente del cambio climático. En este sentido, la economía mexicana deberá instrumentar un intenso proceso de adaptación considerando diversas combinaciones de cultivos, semillas mejoradas, métodos de riego más eficientes, desplazamientos de cultivos e incorporación de nuevas tecnologías.
6. La adaptación es un componente fundamental para evaluar los impactos del cambio climático. Por ejemplo, un proceso de adaptación exitoso puede incluso reducir los impactos del cambio climático en más de la mitad. Los impactos climáticos son de diversa índole y por tanto los procesos de adaptación son extremadamente complejos y difíciles de identificar. Los procesos de adaptación tienen costos significativos, pero también existen costos importantes de no realizarse. De hecho las proyecciones realizadas sugieren que la magnitud de los ajustes necesarios en el largo plazo son impresionantes y difícilmente la adaptación será suficiente. En este sentido, la adaptación puede reducir los costos del cambio climático pero es insuficiente para controlar los impactos. En este contexto, es importante identificar la noción de capacidad de adaptación entre el sector privado y el público:
  - 6.1. En el sector privado el proceso de adaptación se basa en ajustes en el comportamiento de los agentes (i.e. cambio de días de siembra), de la tecnología y del capital disponible. Estas condiciones son mejores en los países desarrollados que parecen tener entonces mejores condiciones de adaptación. De hecho puede argumentarse que los países con mayor ingreso *per cápita* tienen mejores condiciones de adaptación.
  - 6.2. El sector público requiere de instituciones públicas fuertes y eficientes que promuevan y ordenen el proceso de adaptación. En este sentido, los países en desarrollo tienen una menor capacidad de adaptación que aquella disponible en los países desarrollados. Asimismo, es común que las instituciones públicas tengan otros intereses como sus impactos distributivos que pueden interferir en un proceso de adaptación exitoso. En todo caso, la construcción de un proceso de adaptación eficiente y exitoso debe considerar los siguientes puntos:
    - Una adaptación es eficiente en el caso en que los beneficios exceden los costos. Por desgracia, con la estructura de precios relativos actuales el sector privado puede buscar una adaptación que aparece como eficiente pero que no incluye las externalidades negativas que genera. Así, esta adaptación privada es ineficiente en la medida en que genera externalidades negativas. Por ejemplo, en la agricultura se compensa el aumento de la temperatura con un incremento del riego, probablemente sobre-explotando los mantos acuíferos. Asimismo, los impactos climáticos se aplican sobre grupos heterogéneos que reaccionan de manera distinta y probablemente afectándose entre ellos.
    - La adaptación se hace bajo incertidumbre lo que aumenta sus costos y reduce su eficiencia ante la falta de información oportuna y de largo plazo. En este sentido, la adaptación privada es ineficiente en la medida en que genera externalidades que no son corregidas. Es por ello que el sector público debe ordenar y liderar el proceso de adaptación aunque debe reconocerse que ello no garantiza eficiencia. En todo caso debe considerarse que una adaptación eficiente debe tener costos menores que sus beneficios incluyendo las externalidades negativas.

7. Los impactos del cambio climático sobre las actividades agropecuarias tienen además un impacto significativo sobre la seguridad alimentaria. Esto es, una reducción de la producción de alimentos y de los ingresos de los productores rurales o un aumento de los precios de los alimentos tienen consecuencias negativas significativas sobre la seguridad alimentaria. Ello debe ponderarse con particular atención.
8. La construcción de una agricultura sustentable requiere considerar el cambio en la disponibilidad de agua, que conlleva el cambio climático.

## RECOMENDACIONES

- a. Los costos y los procesos de adaptación en el sector agropecuario requieren la participación activa del sector público a través de diversos mecanismos y en colaboración a la iniciativa privada.
- b. Es necesario mejorar la administración de riesgos incrementando el seguro agropecuario y no sólo utilizarlo como condición para conseguir un crédito.
- c. Es necesario mejorar el manejo del agua y de la tierra y evitar la erosión.
- d. Entre los instrumentos a aplicar destacan:
  - Cambios en las prácticas agrícolas con la introducción de variedades de cultivos de mayor rendimiento.
  - Uso de pronósticos climáticos estacionales y de información climática en general.
  - Estudios sobre cultivos resistentes a inundaciones parciales, a temperaturas elevadas y a la sequía y buscar la diseminación de tales cultivos.
  - Nuevos esquemas de riego para regiones áridas cultivadas.
  - Uso adecuado de fertilizantes.
  - Implementación de un sistema de control de plagas y enfermedades.
  - Reducir los efectos de la contaminación del suelo y del agua superficial, producida por el uso indiscriminado de pesticidas y herbicidas.
  - Mover la agricultura más sensible al clima al altiplano y regiones con más agua sin que ello impacte sustancialmente el cambio de uso de suelo.
  - Instrumentar los seguros agrícolas y pecuarios basados en índices meteorológicos, que asocian los pagos de los seguros a variables objetivas mensurables como la lluvia o la temperatura. Estas pólizas de seguros permiten a los agricultores manejar mejor los riesgos y los estimulan a invertir en actividades agrícolas que exigen una inversión inicial más alta.

## 3.2. RECURSOS HÍDRICOS

### Puntos fundamentales

El agua es un recurso fundamental para la vida y, desde luego, para el conjunto de las actividades económicas. El cambio climático incide de manera directa en la disponibilidad de agua y por esta vía tiene costos económicos significativos. Con base en la estimación de las funciones de demanda de agua, para sus distintos usos, es factible identificar la vulnerabilidad de los recursos hídricos del país. Los resultados de las estimaciones, muestran que el consumo es más sensible al comportamiento de la población y del producto y menos sensible a la trayectoria de los precios relativos. De este modo, se estima que el consumo de agua para uso humano crecerá a una tasa del 1.1% anual en el periodo de 2008 a 2050, llegando a un nivel de 17,615 millones de litros para este el último año. Posteriormente, y de acuerdo a la evolución demográfica, su crecimiento se reducirá, para el período 2050–2100, a una tasa de crecimiento promedio anual de 0.36%. Por su parte, el consumo de agua para el sector agrícola tendrá una tasa de crecimiento promedio anual de 1.1 a 1.3% anual para el período 2008 al 2050, en tanto que en el periodo de 2050 al 2100, su tasa de crecimiento fluctuará entre 0.63 y 0.68%. Las proyecciones de la demanda de agua para uso industrial, para el periodo de 2008 a 2050, muestran un crecimiento de entre 0.7 a 1.5% y para el periodo 2050 al 2100 un crecimiento de entre 0.5 y 0.7% en promedio anual.

Los escenarios de emisión B1, A1B y el A2, consideran un aumento en la temperatura y una disminución de la precipitación media anual. Bajo estas premisas, la disponibilidad natural del recurso hídrico podría disminuir en el futuro entre 2 a 5.2%. Aun sin considerar el impacto en el cambio climático, la vulnerabilidad hídrica a nivel de entidades se incrementará. El cambio climático reforzará entonces esta tendencia sobre la vulnerabilidad. Los resultados al 2100, muestran que los Estados de la frontera norte, incrementarán su vulnerabilidad. Por su parte, los Estados del centro del país, pueden registrar una mayor vulnerabilidad, dado la expansión de los centros urbanos y la creciente demanda originada por la producción agrícola.

De este modo, los costos asociados al cambio climático al 2100 en la demanda de agua se podría ubicar en un rango de 4.50% del PIB para el 2100, con una tasa de descuento de 4%. Estos costos son sólo hipotéticos atendiendo al escenario construido y no consideran una posible reducción de costos en el futuro.

## 1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático tendrá impactos significativos sobre los recursos hídricos del país incidiendo tanto en los niveles de disponibilidad natural del agua, como en los patrones de precipitación y en los eventos extremos. El aumento de la temperatura media a nivel mundial (IPCC, 2007) ocasionará<sup>23</sup> cambios en el ciclo hidrológico (Stern, 2006, Arnell, 2006, IPCC, 2008). México es especialmente vulnerable a estos cambios hidrológicos. En efecto, diversos estudios realizados (Mendoza, *et al.*, 2004, Hernández y Madero, 2004, Morales *et al.*, 2001, Hulme y Sherd, 1999, Mendoza-Salgado, 2006, Conde, *et al.*, 1997, Martínez-Austria y Mundo-Molina, 1995, Martínez-Austria, 2007) muestran que el cambio climático tendrá efectos en los niveles de precipitación en las diferentes regiones del país, generado severas sequías o inundaciones dependiendo de la región. Ello, junto con el incremento esperado en el consumo de agua en sus distintos usos (humano, industrial y agrícola), ubica al país en una situación de alta vulnerabilidad en cuanto a los recursos hídricos (Martínez-Austria, 2007).

De este modo, los principales objetivos de este capítulo se orientan a identificar el grado actual de presión en los recursos hídricos en el país a través de estimar la trayectoria de la demanda del recurso hídrico (considerando sus principales usos) así como los posibles escenarios de estrés hídrico hacia el 2050 y al 2100 ocasionados por el cambio climático y valorar sus costos económicos. En este contexto, se consideran los posibles escenarios de temperatura y precipitación que permiten aproximar el grado de estrés hídrico en el país.

<sup>23</sup> El informe del IPCC (2007) concluye, con base a las 29,000 series de datos analizadas en 75 estudios, que en más de un 89% son coherentes con la dirección del cambio esperado en respuesta al calentamiento global.



## 2. EL CONTEXTO ACTUAL DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN MÉXICO

### 2.1 PRECIPITACIÓN

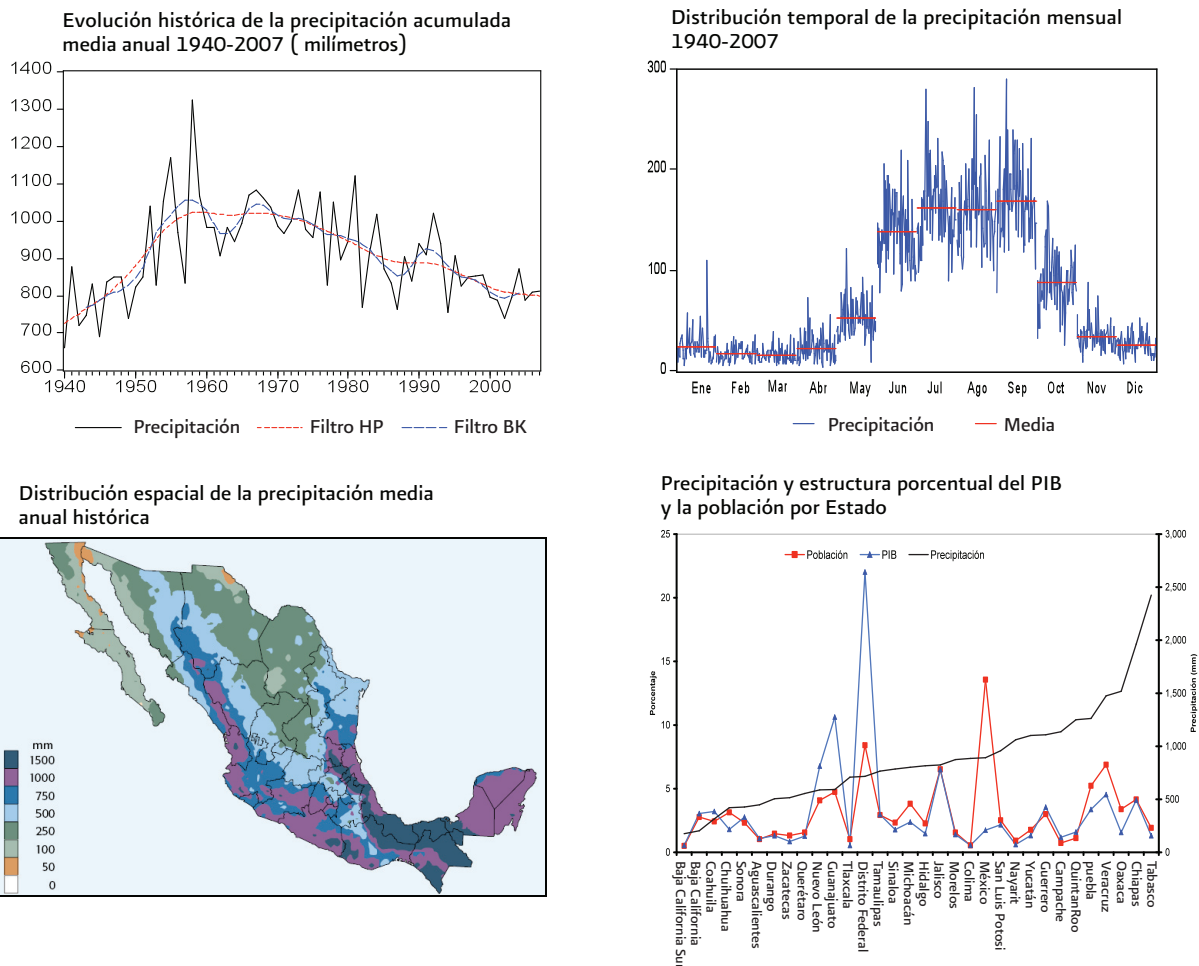
El agua es, sin duda, uno de los recursos naturales más importantes para un desarrollo económico sustentable. No obstante ello, las condiciones actuales de su aprovechamiento y distribución implican un deterioro y agotamiento de los recursos acuíferos del país que se intensificará con los impactos del cambio climático. Las principales características de variables como la precipitación y su distribución espacial son las siguientes (Figura 10):

- La precipitación media anual se ha reducido a un ritmo de 0.4%, en promedio anual desde 1960 a 2007. Así, durante las décadas de los cincuenta y sesenta se registraron niveles promedio de precipitación superiores a los 1,000 mm, en contraste con la década de los noventa, que se reduce a 872 mm y en los últimos seis años a 800 mm. Debe mencionarse sin embargo que existen formas de variabilidad natural del clima de muy largo plazo (al menos veinte a treinta años) que pueden estarse reflejando en este periodo. Por ejemplo, la década de los ochenta correspondió a un periodo relativamente húmedo en el norte de México, mientras que los noventa correspondieron a un periodo seco.
- Los patrones de precipitación del país son ciertamente heterogéneos asociados a las condiciones orográficas y las características geográficas propias de cada región. Así, el 31% del territorio nacional se clasifica como zona árida, el 36% semiárida y el restante 33% en húmeda o subhúmeda (SEMARNAT, 2003); ello no obstante que la precipitación media del país fue de 771.8 mm para el periodo 1940-2000 (CONAGUA, 2007).
- Aproximadamente el 40% del territorio nacional, principalmente en el norte del país, tiene una precipitación media anual en un rango de 100 a 500 mm. En contraste, en 7% del territorio, existen zonas con precipitaciones medias anuales de 1,500 mm, como es el caso de los Estados de Chiapas, Oaxaca, Tabasco y Veracruz. Por su parte, las planicies costeras y sierras del Pacífico, el centro del Golfo de México y el noroeste de Yucatán tienen una precipitación de alrededor de 750 mm con climas subhúmedos que representa el 17% del territorio (Carabias y Landa, 2005).
- En 10 entidades del país se registra una precipitación superior a los 1,000 mm por año, concentran el 51% de la precipitación anual pero contribuyen sólo con el 23% del PIB y tienen el 29% de la población. Por su parte, 11 entidades, que registran una precipitación menor a los 600 mm y que concentran el 17% de la precipitación, aportan el 24.4% de la producción nacional y concentran al 25.4% de la población. Ello muestra un desacoplamiento entre las actividades económicas y el abastecimiento potencial del agua.
- Asimismo, los patrones de precipitación a lo largo del año son también heterogéneos con los niveles de precipitación más elevados en la estación de verano. Además, se registra un aumento en la volatilidad de la precipitación a lo largo de los últimos veinte años indicando una mayor frecuencia de eventos extremos.

Así, la principal tendencia a destacar, en las últimas décadas, es el descenso en los niveles de precipitación y la mayor volatilidad a lo largo del año, aunque como se mencionó anteriormente, la tendencia construida con una serie de 30 a 40 años de datos puede estar reflejando parte de la variabilidad natural del clima de muy baja frecuencia. Esta tendencia a menor precipitación media anual en gran parte del país podría tener una alta probabilidad de mantenerse y aun incrementarse, para finales de siglo, bajo la presencia de un aumento en la temperatura global (IPCC, 2008, Meehl *et al.*, 2007). En estas condiciones los principales impactos del cambio climático incidirán de manera heterogénea en las distintas regiones del país y es de esperarse que conforme avance el siglo estos impactos erosionarán las condiciones socioeconómicas de las actividades económicas y de la población en las regiones de mayor vulnerabilidad hídrica, al aumentar los costos del agua.



**Figura 10. Características principales de la precipitación en México**



Nota: Filtro HP=filtro Hodrick-Prescott, Filtro Bk = Filtro Baxter-king. La estructura porcentual del PIB, corresponde al promedio de 2000-2006 y la estructura porcentual de la población, corresponde al dato de 2006.

Fuente: Precipitación, con base en información de IMTA-SEMARNAT, Extractor rápido de información climatológica V.I.I (Eric III).

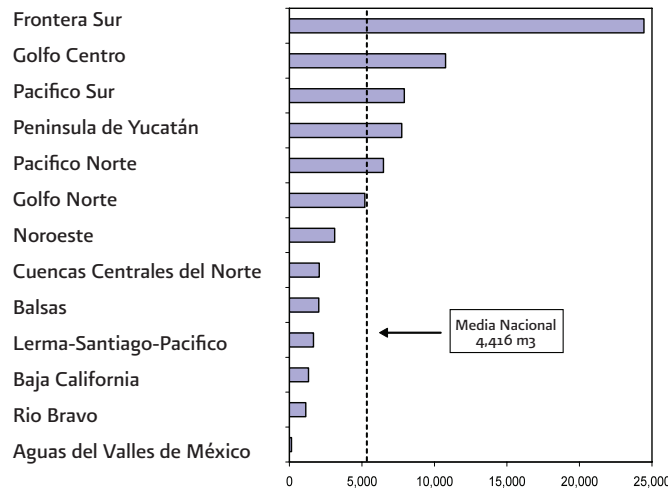
Mapa distribución espacial de la precipitación con base en SEMARNAT (2008) Plan Nacional Hídrico 2007-2012.

Estructura porcentual del PIB, Población y Precipitación con base en información de CONAGUA Estadísticas del Agua en México 2007, INEGI y CONAPO

## 2.2 DISPONIBILIDAD NATURAL DEL AGUA

El país cuenta con una disponibilidad natural media total de agua de 465,137 millones de metros cúbicos. Así, de acuerdo al censo de población del 2000 (104.8 millones de habitantes) el agua disponible *per cápita* es de 4,438 metros cúbicos por habitante. Bajo este criterio de disponibilidad de agua *per cápita*, México se ubica en el lugar número 90 de una lista de 177 países (CONAGUA, 2007). Sin embargo, el aspecto fundamental a destacar es que la precipitación no es homogénea en todo el territorio nacional, y en consecuencia el agua que se escurre y almacena se distribuye físicamente de manera heterogénea tanto a nivel espacial como estacional (Carabias y Landa, 2005). En efecto, esta situación genera una enorme variación de la disponibilidad *per cápita* a nivel regional (Gráfica 69).

**Gráfica 69. Disponibilidad natural media per cápita 2006 por región hidrológica (m<sup>3</sup>/habitante/año)**



Fuente: Con base en información de CONAGUA Estadísticas del Agua en México 2007

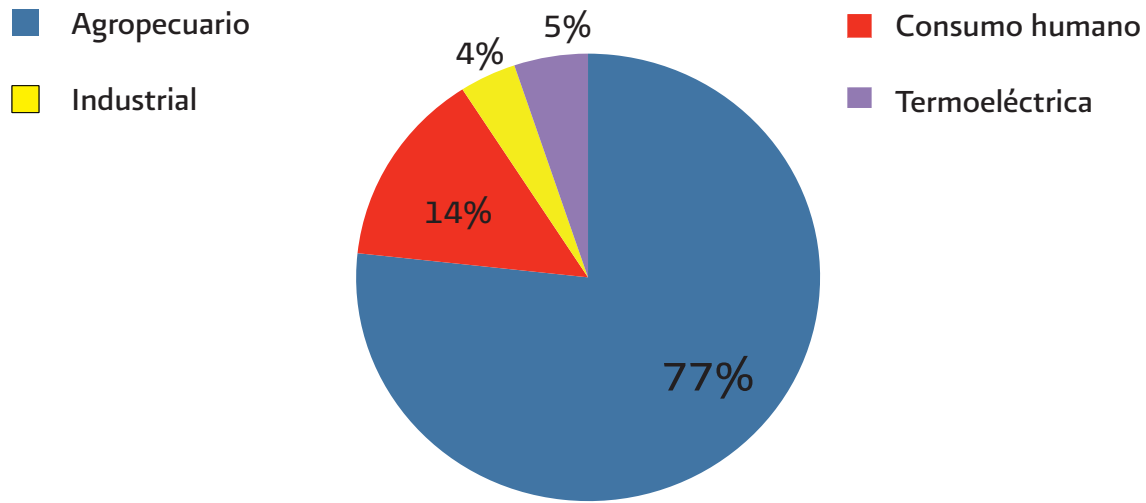
Así, en las regiones de la Frontera Sur y el Golfo Centro se concentra el 56% de la disponibilidad natural, con niveles de 157 y 103 millones de metros cúbicos al año, respectivamente. Es decir, los habitantes de estas regiones tiene una disponibilidad *per cápita* superior en 5.5 y 2.4 veces con respecto al promedio nacional, pero sólo representan el 15.2% de la población total. Por el otro lado, en cinco de las ocho regiones hidrológicas (Baja California, Balsas, Río Bravo, Cuencas Centrales del Norte y Lerma-Santiago-Pacífico) la disponibilidad *per cápita* fluctúa entre 1,131 y 2,000 metros cúbicos por habitante lo que representa el 0.26% y el 0.47% del promedio nacional, respectivamente.

### 3. DEMANDA DE AGUA POR SECTORES

El agua ofrece diversos servicios ambientales y es un insumo fundamental en el consumo humano y en distintas actividades productivas como la agricultura y la industria; además, el agua tiene un valor recreacional y estético que se conoce como valor de no uso (Carson, *et al.*, 1999, Freeman, 2003 y Krutilla, 1967) y es también utilizado como solvente general o como lugar de descarga. No obstante ello, el uso y la preservación de este recurso vital presenta diversos problemas tales como sobreexplotación y contaminación de los mantos acuíferos y de los ríos y lagos, mala calidad del agua y escasez en algunas zonas del país y una creciente demanda difícil de satisfacer, originada tanto en el aumento de la población, del ingreso y un precio relativamente bajo que no refleja su importancia social y que induce a su sobre explotación.

Los usos del agua en México se dividen en consuntivos y no consuntivos. Los consuntivos son aquellos en los que el agua es transportada a su lugar de uso y la totalidad o parte de ella, no regresa al cuerpo de agua. Los usos no consuntivos son aquellos en los que el agua se utiliza en el mismo cuerpo de agua o con un desvío mínimo, por lo que regresa al entorno inmediatamente después de haberse utilizado, aprovechado o explotado, aunque, en ocasiones regrese con cambios de sus características físicas, químicas, o biológicas. Así, en 2007, del total del agua naturalmente disponible, se estima que se extrajeron de ríos, lagos y acuíferos del país alrededor de 79 mil millones de metros cúbicos para los distintos usos (agrícola, el abastecimiento público, la industria autoabastecida y las termoeléctricas). De este volumen el 77% correspondió al uso agrícola, es decir aproximadamente 61 mil millones de metros cúbicos, el 14% fue para el abastecimiento público o consumo humano (11 mil millones de metros cúbicos), el 4% corresponde al consumo realizado por el sector industrial (3 mil millones de metros cúbicos) y el 5% en termoeléctricas (Gráfica 70).

Gráfica 70. Distribución del consumo de agua: uso consuntivo 2007



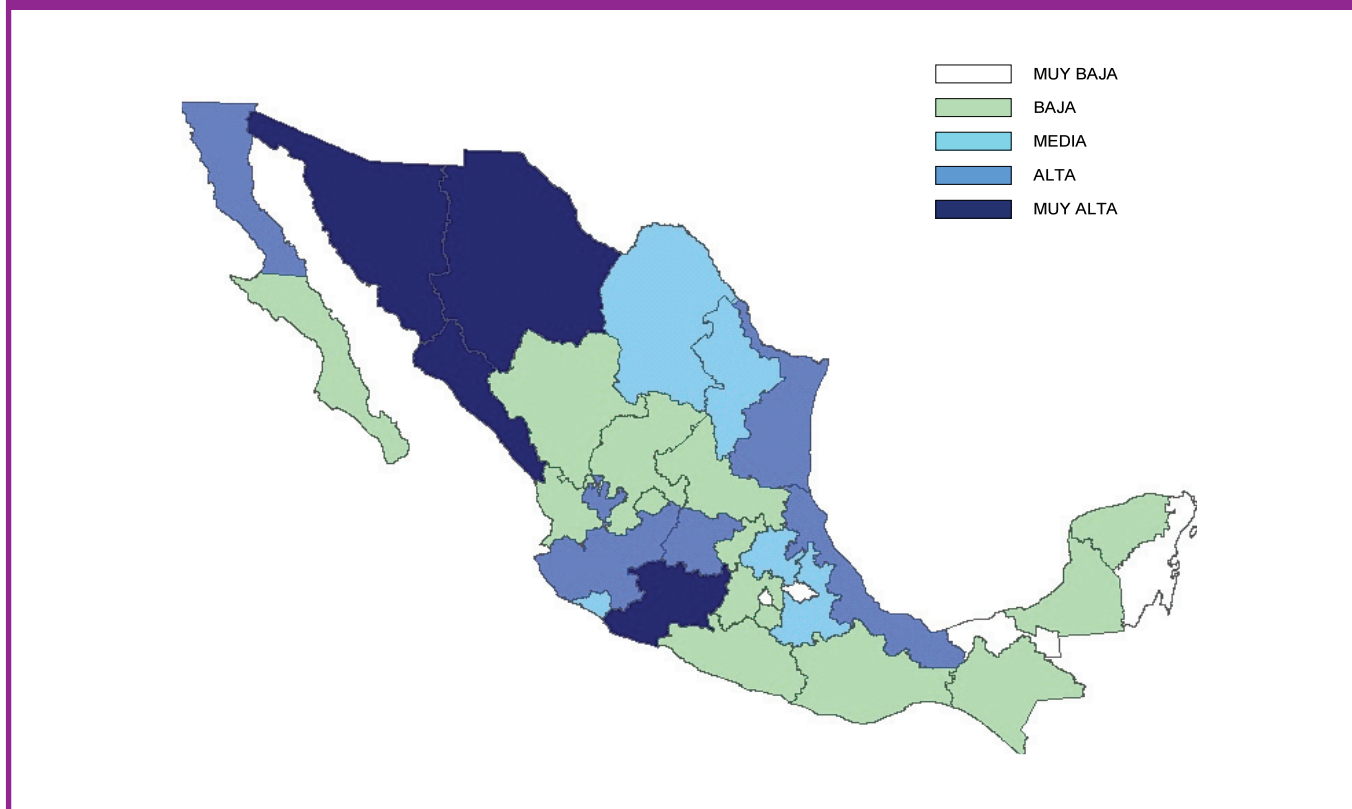
Fuente: Con base en información de CONAGUA Estadísticas del Agua en México 2007

Las principales características de este consumo por sectores se pueden resumir en los siguientes puntos:

### SECTOR AGROPECUARIO

- El agua extraída para el uso agropecuario es utilizada en su mayoría para el riego de 6.46 millones de hectáreas (3.5 millones de hectáreas se ubican en 85 distritos de riego, y 2.96 millones en 39,492 unidades de riego) (Mapa 1) y solo el 6.3% del volumen de agua utilizado se consume en actividades pecuarias, acuicultura y otros usos y aprovechamientos (CONAGUA, 2007).
- El 81% del agua extraída de los acuíferos se utiliza en la agricultura, por lo que el agua subterránea es de gran importancia para la producción agrícola. En efecto, la agricultura de riego depende del agua subterránea, la que enfrenta problemas crecientes debido a la sobreexplotación de los acuíferos.
- La información de los distritos de riego muestra además que los requerimientos por hectárea reportan un valor cercano a 10,000 metros cúbicos por hectárea aunque con una ligera tendencia descendente. En general, los requerimientos de agua no se han modificado sustancialmente en los últimos veinte años indicando un estancamiento en la eficiencia de la agricultura de riego.
- Las carencias y deficiencias en la tecnología e infraestructura de riego hacen que la eficiencia sea tan solo de 46%, es decir, 54% del agua asignada regresa al ciclo hidrológico sin ser aprovechada en la agricultura. Esto es, un volumen de aproximadamente 42,660 millones de metros cúbicos (cantidad que es más de tres veces la que se necesita para el abastecimiento público de todo el país), regresa a los acuíferos y cuerpos superficiales sin ser utilizado en los cultivos (Carabias y Landa, 2005).
- La distribución espacial del consumo del recurso hídrico para uso agrícola muestra una gran concentración en algunos Estados de la República Mexicana. De hecho sólo cuatro entidades (Sinaloa, Sonora, Michoacán y Chihuahua) concentran el 40% de la demanda de agua para uso agrícola.
- Estas entidades, aportan el 26% de la producción agropecuaria de todo el país. Así, un escenario de aumento de la temperatura global y un menor nivel de precipitación, en particular en la región del Pacífico Norte, tendría impactos negativos significativos en la producción agropecuaria.

Mapa 1. Demanda de agua para uso agropecuario 2007

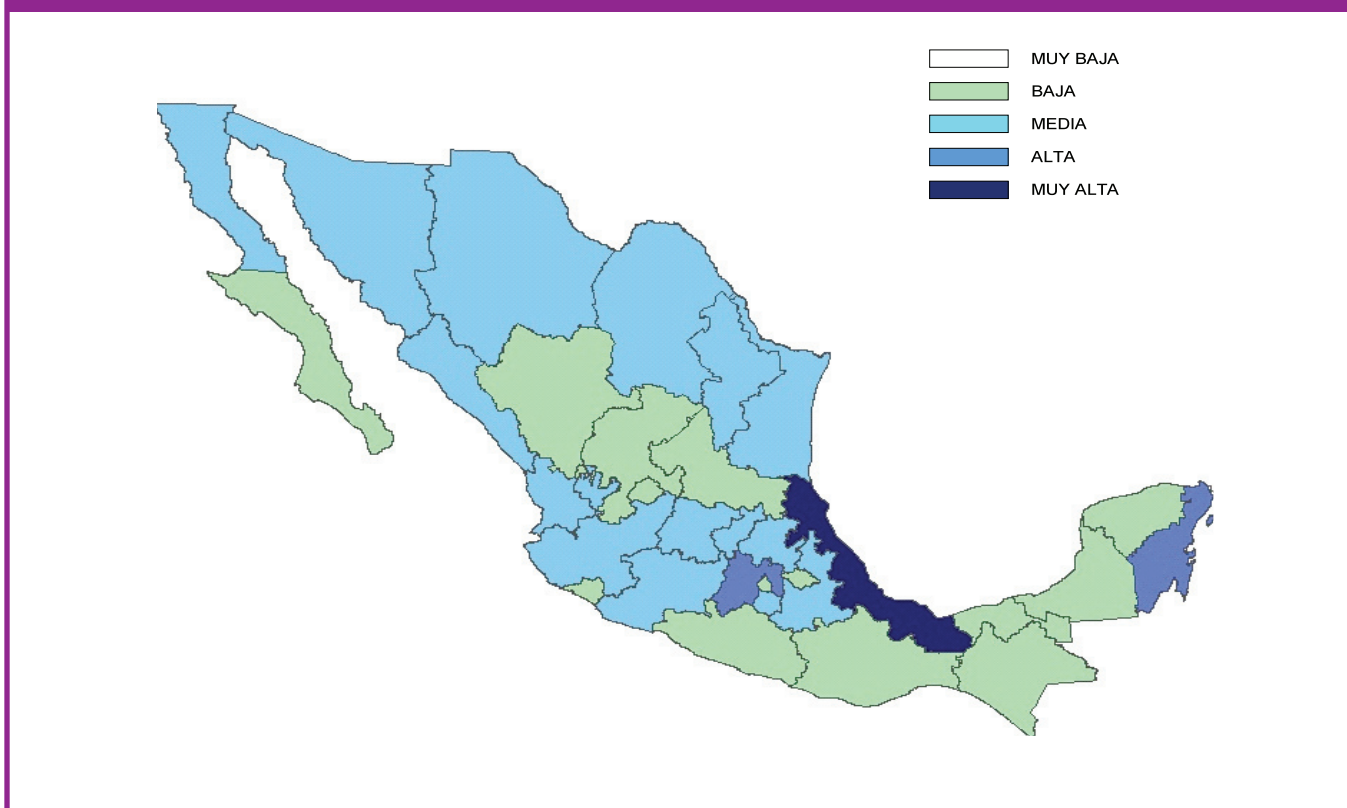


### ABASTECIMIENTO PÚBLICO (CONSUMO HUMANO)

- La demanda para abastecimiento público o consumo humano muestra una trayectoria ascendente a lo largo de los últimos veinte años, con un ritmo de crecimiento de 2.3% en promedio anual.
- El consumo de agua para este tipo de uso fue de 11,158 m<sup>3</sup> en 2007, es decir, cada habitante del país recibió, en promedio en 2007, aproximadamente 106 mil litros.
- Existen rezagos en la cobertura nacional de agua potable, que en 2006, se estima que cubría al 89.6% de la población (CONAGUA, 2007) y de alcantarillado al 86% de los habitantes del país. Asimismo, existe una división importante entre la población urbana y rural ya que mientras el 94.5% de la población urbana cuenta con el servicio de agua potable y en un porcentaje similar (94.5%) está conectado a la red pública de alcantarillado; sólo el 70.7% de la población del medio rural tiene acceso al agua potable y sólo el 57.5% dispone de alcantarillado.
- El consumo para abastecimiento público se concentra en pocas entidades, destacando el Estado de México, cuyo consumo, en 2007, fue de 1,338 millones de metros cúbicos, cantidad que representa el 12% del consumo nacional; en segunda instancia se ubica el Distrito Federal con un volumen de 1,089 millones de m<sup>3</sup> (9.8% del consumo nacional). El 51.8% del volumen de agua destinado al consumo humano se concentra espacialmente en siete estados del país (Mapa 2).



Mapa 3. Demanda de agua para para uso industrial 2007

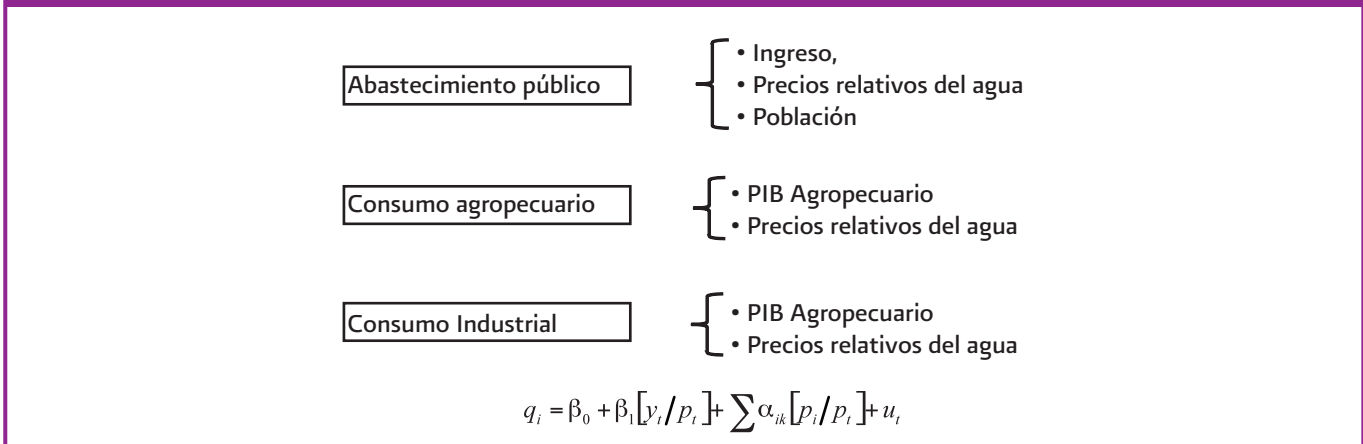


Como se observa los diferentes sectores muestran ritmos de crecimiento diferenciados con características también distintas. Así, por ejemplo, el sector agropecuario es el principal consumidor del recurso hídrico pero muestra una enorme ineficiencia en su aprovechamiento. En el caso del consumo humano se concentra su uso en los centros urbanos y existe un rezago importante en la cobertura de las zonas rurales. El sector industrial aunque no registra un elevado consumo tiene impactos negativos significativos en términos de descargas y contaminación, además que el sector servicios sobre todo en la actividad turística es un sector con una creciente demanda de agua. Estas características muestran la importancia de considerar diferentes escenarios prospectivos sobre la demanda para cada uno de estos sectores para identificar los efectos específicos del cambio climático.

#### 4. EVIDENCIA EMPÍRICA DE LA DEMANDA DE AGUA EN MÉXICO

La estimación de la demanda del recurso hídrico de los tres sectores se realizó por medio de una ecuación tradicional de demanda donde el consumo de agua es función del nivel de ingreso, de la población y de los precios relativos del agua como se representa en la Figura 11. Las estimaciones se realizaron para cada uno de los Estados de la República.

**Figura 11. Especificación de las funciones de demanda de agua por sectores**



Los modelos econométricos estimados incluyen orden de integración de las series y cointegración, así, se estimaron modelos de corrección de errores, que incluyen un vector de cointegración o en otros casos modelos de especificación dinámica. En este sentido, la estrategia econométrica buscó combinar el uso de técnicas econométricas modernas con la obtención de modelos causales con sentido económico que permitieran, además, obtener simulaciones y pronósticos relativamente razonables. Asimismo, se buscó que los modelos econométricos finales no tuvieran un sobre-ajuste a los datos del periodo histórico ya que ello implicaría, no solo modelar las regularidades de la serie, sino sus componentes aleatorios más importantes.

### Consideraciones generales sobre la demanda de agua en México

Es pertinente considerar los siguientes aspectos en la especificación de las funciones de demanda de agua en México:

1. La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) es el organismo público responsable de administrar el recurso, utilizando dos instrumentos de regulación, uno vía cantidades, a las que se le denomina concesiones o asignaciones y que son permisos para extraer el recurso. El segundo instrumento corresponde a los precios, denominados derechos, que son los montos que deben pagar los agentes económicos para extraer agua o para descargar agua residual.
2. El marco normativo en el cual se gestiona el agua en México esta formado con dos reglamentaciones fundamentales: la Ley de Aguas Nacionales (LAN) y la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua (LFD). En México la Nación es la propietaria del recurso y concede o asigna el agua a través de la CONAGUA y de los Consejos de Cuenca, a los agentes económicos para que hagan un uso productivo de ella.
3. Al precio del agua se le denomina derecho por explotación, uso o aprovechamiento de agua. Desde el punto de vista económico, la CONAGUA es un monopolio discriminador que segmenta el mercado en función de la escasez relativa del recurso y de la productividad media en cada uno de sus diferentes usos. Situación que se presenta tanto en organismos públicos como privados en la mayoría de los países del mundo (2008).

El precio del agua no ha sido un instrumento de control de la demanda de agua, sino un instrumento de financiamiento parcial del sector hidráulico, cuando se desea controlar la extracción se recurre a la veda. Esto es, cuando un acuífero o una cuenca se encuentran sobreexplotados entonces el gobierno federal emite vedas para prohibir o restringir la extracción del recurso. En el caso del agua subterránea 145 acuíferos del país se encuentran vedados.



## EL ABASTECIMIENTO PÚBLICO DE AGUA

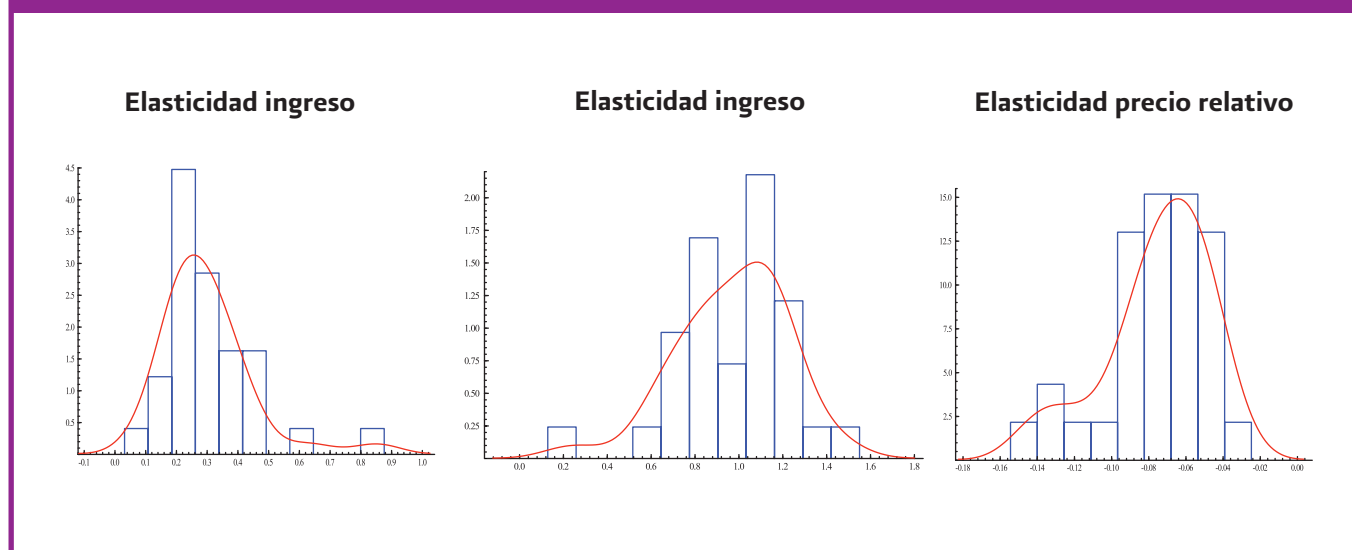
El abastecimiento público, también denominado como consumo humano ( $ch_t$ ), se utilizó una especificación general que incluye como variables explicativas el nivel de ingreso ( $y_t$ ) aproximado por el producto interno bruto estatal (PIB), la población ( $pob_t$ ) y los precios relativos ( $pra_t$ ) definidos a partir de las tarifas publicadas por CONAGUA. La ecuación de largo plazo (11) para cada Estado se define como:

$$(11) \quad ch_t = \beta_0 + \beta_1 y_t + \beta_2 pra_t + \beta_3 pob_t + u_t$$

Los principales resultados obtenidos indican que:

- La elasticidad ingreso del consumo de agua para abastecimiento público en todas la entidades resulto menor a la unidad. De este modo, un incremento del ingreso propicia que la demanda de agua aumente en una menor proporción (Gráfica 71).
- El incremento de la población mantiene una relación positiva con el consumo de agua, pero la elasticidad es muy alta en algunas entidades, incluso es mayor a la unidad. En general su valor se ubica con mayor frecuencia entre 0.8 y 1.2, indicando que la principal presión sobre los recursos hídricos se origina en el incremento de la población, principalmente en los centros urbanos (Gráfica 71) (Clarke y King, 2004).
- La elasticidad precio es negativa pero muy baja. Ello significa que tiene escaso peso para explicar la demanda de agua para abastecimiento público. En este sentido, el resultado es bastante consistente con la evidencia internacional y no es exclusivo de México (Galindo y Montesillos, 1998) y en realidad se presenta en la mayoría de las ciudades del mundo (Chen, H. y Yang, Z.F., 2008).
- La efectividad de aplicar incrementos en las tarifas, como instrumento económico, para controlar el consumo de agua puede ser limitada atendiendo la magnitud de las elasticidades. Esto es, el consumo de agua tenderá a aumentar incluso en un escenario de bajo crecimiento y en el caso en que los aumentos de los precios reales no sean particularmente sustanciales. No obstante ello, la señal de precios puede ser relevante para fomentar una mejor administración del recurso.
- Así, el factor fundamental a considerar, en la demanda para abastecimiento público, será la evolución de la población y sobre todo su ubicación espacial a lo largo de todo el territorio.

Gráfica 71. Consumo humano: Elasticidad ingreso, precio relativo y población

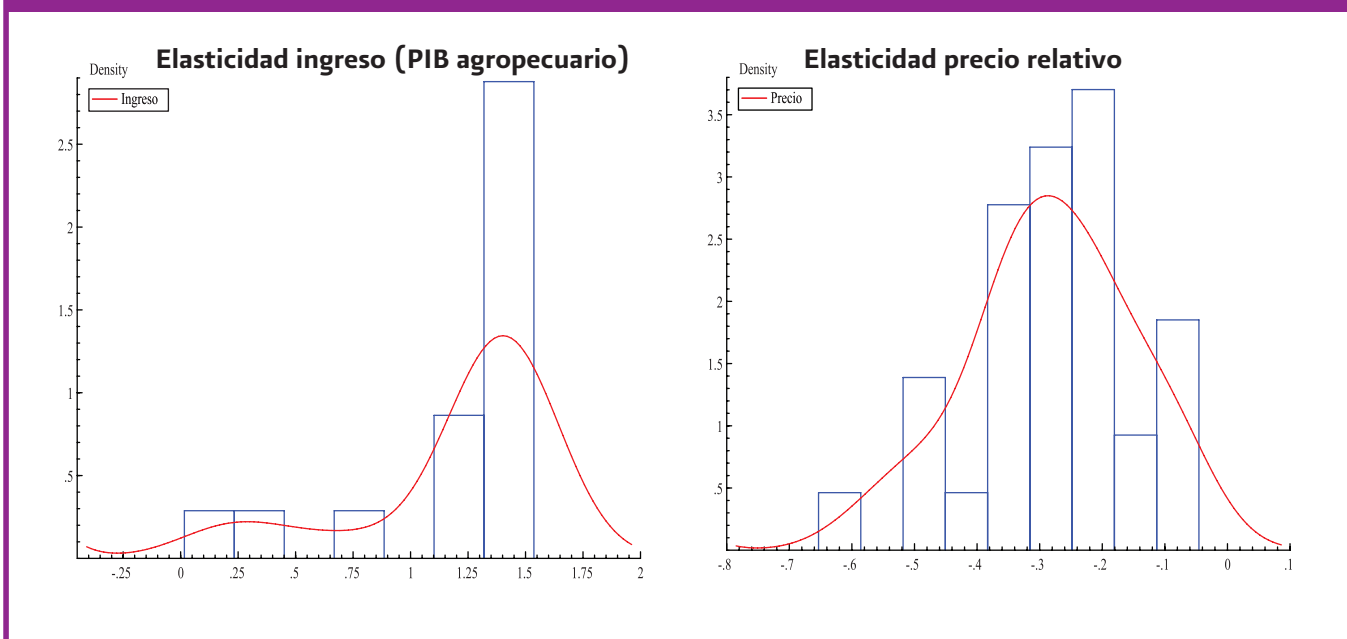




## EL SECTOR AGROPECUARIO

- La elasticidad ingreso es bastante elevada; en la mayoría de los Estados es mayor a la unidad. De tal forma que el conjunto de actividades agropecuarias ejercen una presión más que proporcional en el consumo de agua (Gráfica 72).
- Estas elasticidades se explican, en gran medida, por el uso ineficiente del agua en las actividades agrícolas. En efecto, se estima que la eficiencia global del riego es cercana al 45% (Semarnat, 2003).
- Ello plantea la necesidad de mejorar la eficiencia en los sistemas de riego para disminuir el consumo. Así, por ejemplo, Speelman, *et al.*, (2008) muestran que los agricultores no tienen un incentivo a mejorar la eficiencia en los sistemas de riego ante la ausencia de un precio del agua.
- La introducción gradual de un precio puede ayudar a mejorar la eficiencia, pero es importante considerar que los agricultores de bajos ingresos deberán tener apoyos complementarios para evitar que el incremento en los precios afecte negativamente su producción.

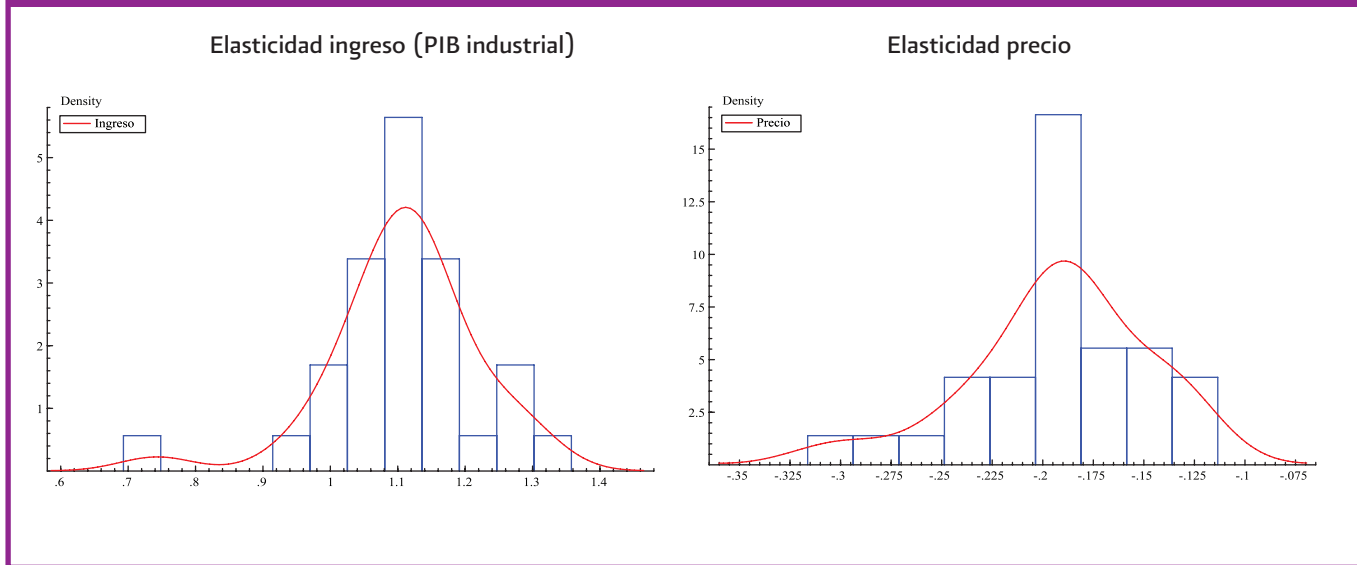
Gráfica 72. Consumo agrícola: Elasticidad ingreso y precio relativo



## EL SECTOR INDUSTRIAL

- La elasticidad ingreso es superior a la unidad. De este modo, el consumo de agua responde más que proporcionalmente a la actividad económica. Por ejemplo, un aumento de la producción industrial de 3% requiere un aumento en el consumo de agua de entre 3.3% y 3.6%, (Gráfica 73).
- Es importante mencionar que 35% del volumen total de agua se utiliza como materia prima o como medio de producción. Por ello puede considerarse como un insumo adicional por lo que su calidad es un factor importante para su uso.
- La elasticidad del precio relativo es negativa y se ubica en un rango de -0.15 a -0.27, es decir el sector industrial muestra una mayor respuesta a los cambios en el precio que en los sectores agrícola y de abastecimiento público (Gráfica 73). En este caso, los precios pueden tener un mayor impacto como un instrumento económico para racionalizar relativamente el consumo de agua para uso industrial y muestra que este sector ha desarrollado alternativas para hacer más eficiente el uso del agua.

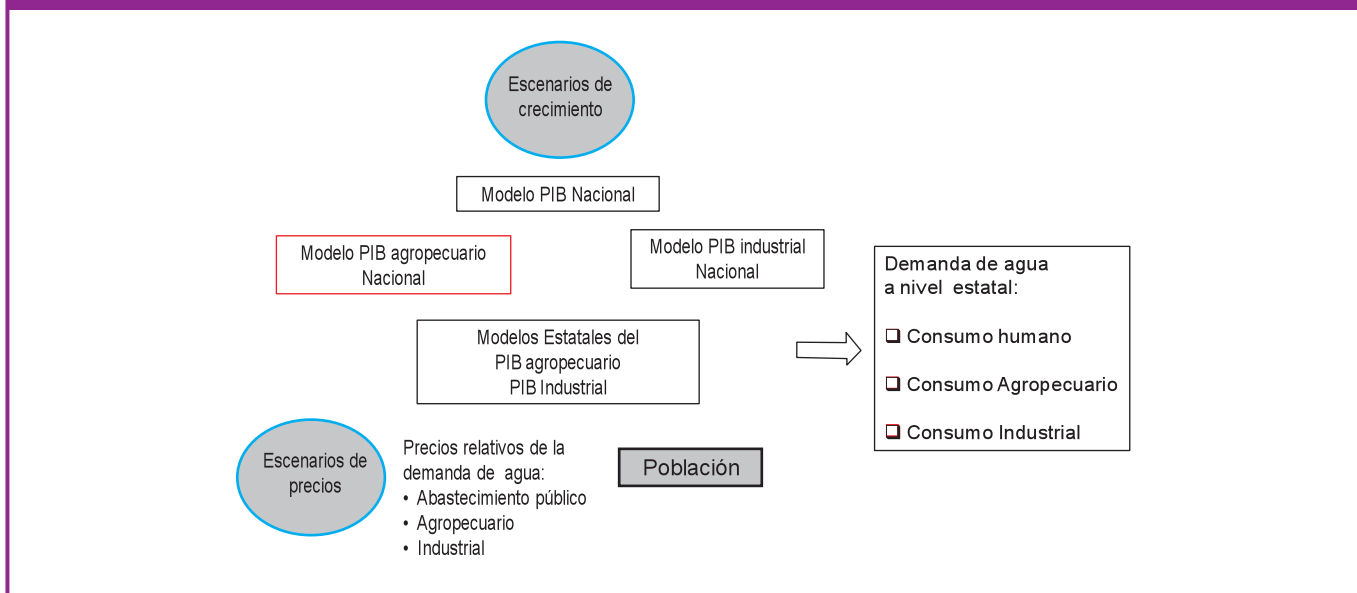
**Gráfica 73. Consumo Industrial: Elasticidad ingreso y precio relativo**



## 5. PRONÓSTICO DE CONSUMO DE AGUA POR SECTORES AL 2100

Los pronósticos de consumo de agua a nivel sectorial se realizaron utilizando las proyecciones sectoriales del PIB y los pronósticos de población presentados en el capítulo de escenarios macroeconómicos (Figura 12). Es importante destacar que, en el caso de las poblaciones por Estado al 2100 se calcularon por medio de estimaciones de modelos autorregresivos integrados de media móvil ARIMA y luego se consolidaron (Brooks, 2002). Por otra parte, en lo que se refiere a los precios relativos del agua, en cada uno de los sectores, bajo el escenario base se asume que los precios relativos permanecen constantes. Ello indicaría que las tarifas para el volumen concesionado de agua se incrementan en una proporción similar al incremento en el nivel general de precios.

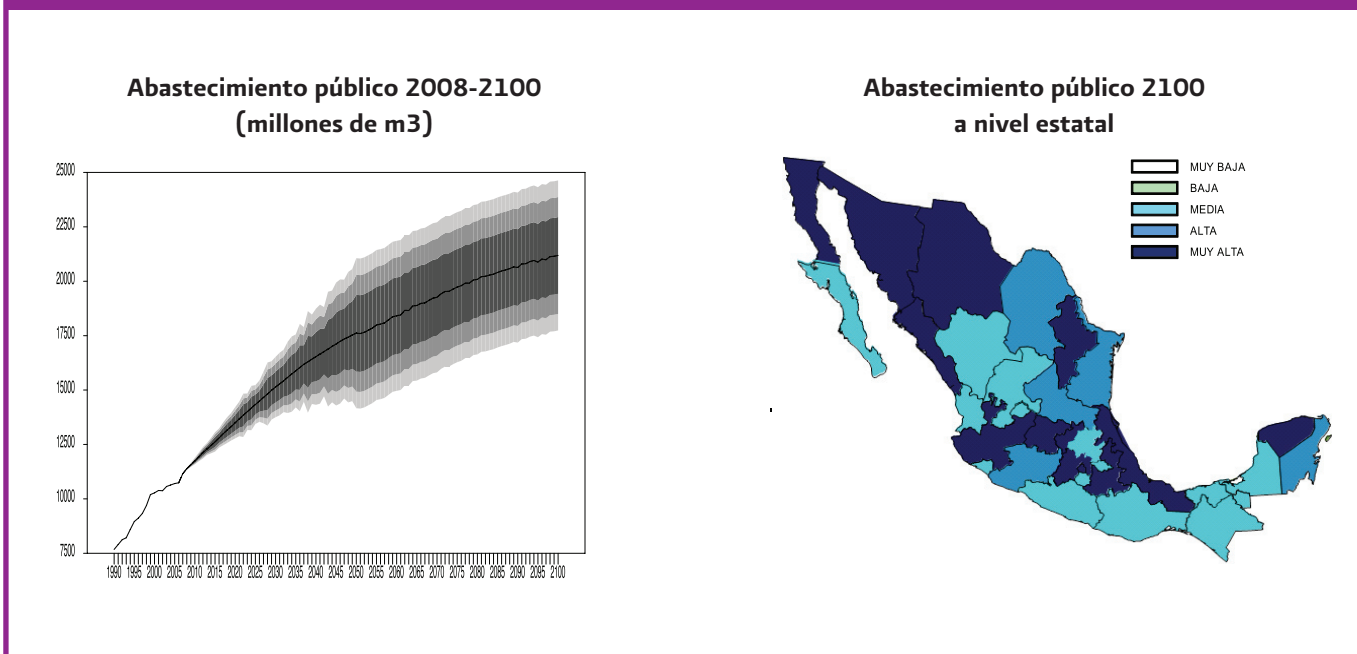
**Figura 12. Generación del pronóstico de la demanda de agua**



## ABASTECIMIENTO PÚBLICO

- En el caso del agua para uso humano se espera un ritmo de crecimiento del orden del 1.1% anual en el periodo de 2008 a 2050, llegando a un nivel de 17,615 millones de litros para este el último año. Sin embargo, se espera que dicho ritmo de crecimiento disminuya para el período 2050–2100, mostrando una tasa de crecimiento promedio anual de 0.36%.
- Las bandas de probabilidad indican que el ritmo de crecimiento fluctuará en un rango de 0.8 a 1.4%, con una probabilidad de ocurrencia de 60% para el período 2008–2050, y entre 0.41 y 0.32% para el período 2050–2100. Ello implica, que a nivel agregado el consumo, se podría ubicar en un rango de 15,851 a 19,378 millones de litros en 2050, y de 19,423 a 22,949 millones de litros para el año 2100, asumiendo un nivel de probabilidad de 60% (Gráfica 74).
- Las cinco entidades (Chihuahua, Sinaloa, Nuevo León, Veracruz y Guanajuato) que actualmente se ubican en la categoría de “Alta demanda”, dado su nivel de consumo, pasarían en 2100 a la categoría de “Muy alta”; además que se agregarían los Estados de Yucatán, Puebla y Querétaro, dado el incremento esperado de la población.
- En la categoría de “Alta demanda” para el 2050 se pueden ubicar cinco entidades Baja California, Coahuila, San Luis Potosí, Tamaulipas y Michoacán. De tal manera que, prácticamente, la mitad de las entidades del país incrementarían de manera considerable la demanda de agua para abastecimiento público.

Gráfica 74. Proyecciones de la demanda de agua para abastecimiento público

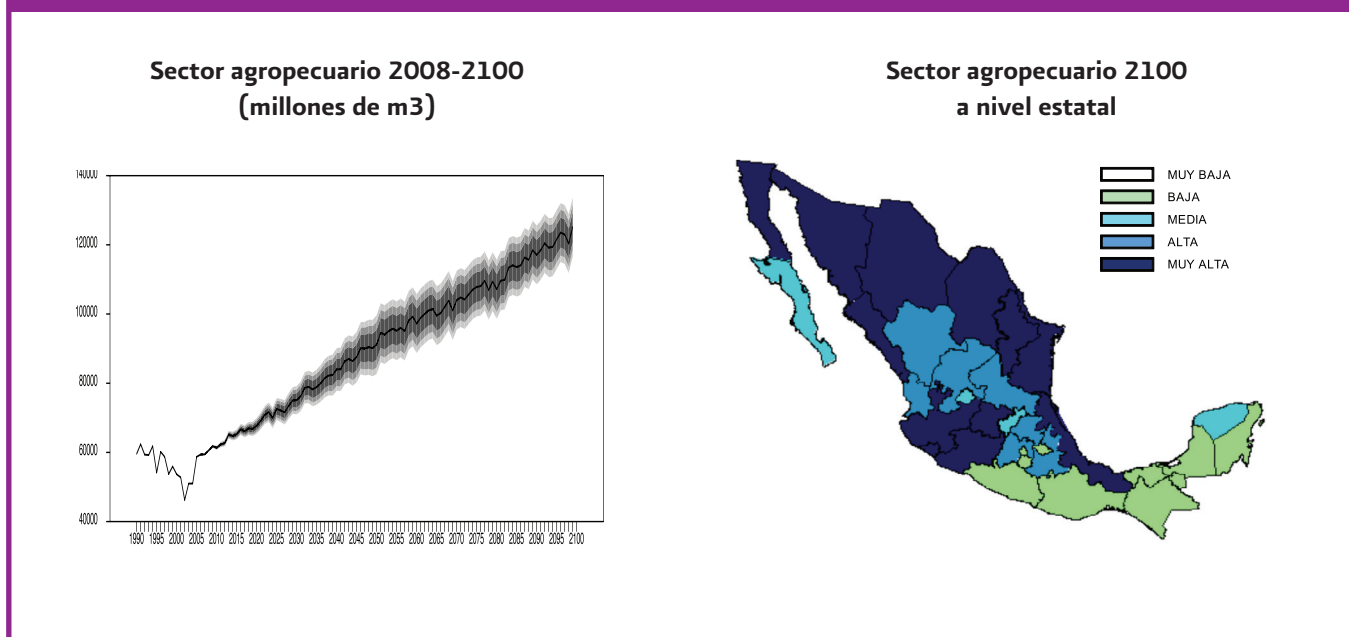


## SECTOR AGROPECUARIO

- El consumo de agua para el sector agrícola muestra un crecimiento promedio anual de 1.1 a 1.3% anual, con una probabilidad de ocurrencia del 60% para el período 2008 – 2050. Del mismo modo, se observa una desaceleración durante el segundo período (2050 – 2100) con una tasa de crecimiento que fluctúa entre el 0.63% y el 0.68% (Gráfica 75).

- Considerando, que no se presenta un cambio en la política de precios, o incrementos en las tarifas, además de que no se realizan políticas orientadas a mejorar la eficiencia en el sistema de riego, el volumen utilizado por la agricultura en 2050 se podría ubicar en un rango de 86,856 a 95,552 millones de litros con un 60% de probabilidad, y entre 120,837 y 129,532 millones de litros para el año 2100.
- Los resultados de las simulaciones realizadas hacia el 2100 muestra que los estados del norte del país se ubicarían en la categoría de “Muy alta demanda”, además de las entidades de Sinaloa, Jalisco, Guanajuato, Michoacán y Veracruz. Ello implicaría que se tendrían hasta 11 entidades en la categoría de mayor consumo de agua para uso agropecuario. También se observa un incremento en el volumen de agua para satisfacer las actividades agropecuarias en las entidades del centro del país.

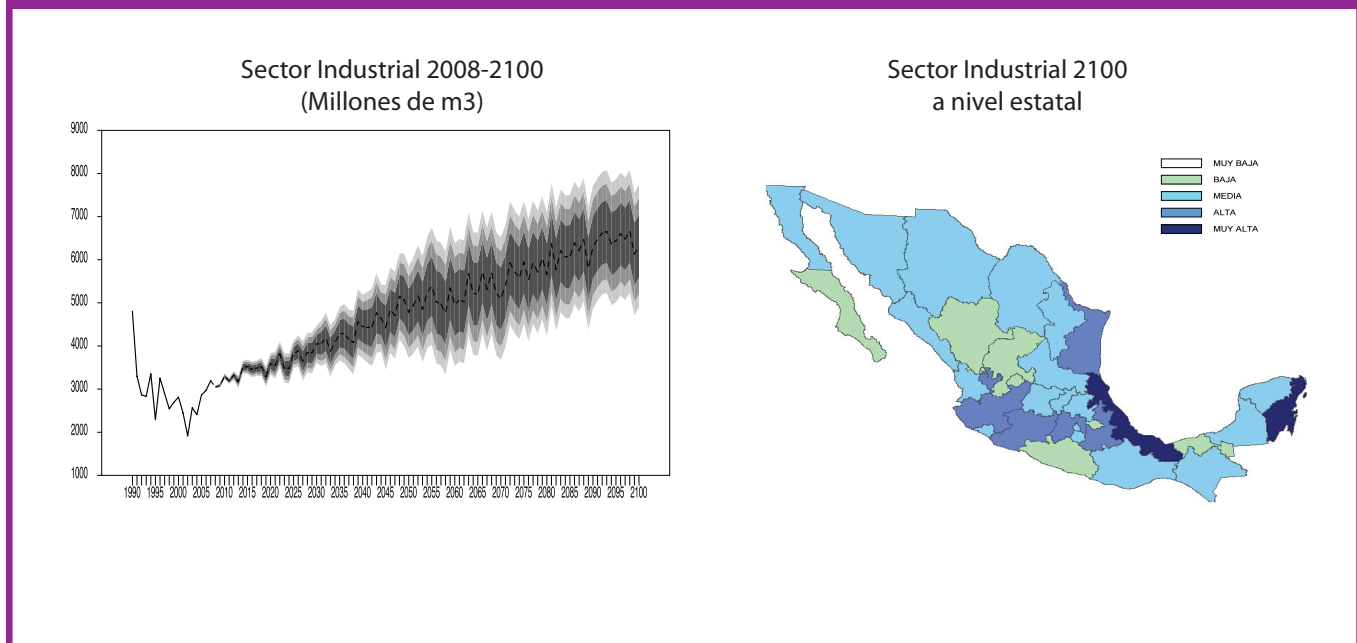
**Gráfica 75. Proyecciones de la demanda de agua para uso agropecuario 2008-2100**



## SECTOR INDUSTRIAL

- Las proyecciones de la demanda de agua para uso industrial en el periodo de 2008 a 2050 muestra una trayectoria ascendente con un ritmo de crecimiento de 0.7 a 1.5%. Así, para el período 2050 al 2100, se espera que la demanda de agua de uso industrial presente un ritmo de crecimiento entre 0.5 y 0.7% en promedio anual (Gráfica 76).
- El volumen necesario para satisfacer las necesidades del sector industrial hacia el 2050 se podrían ubicar en un nivel de 4,243 millones de litros a 5,328 millones de litros, y entre 5,593 y 7,048 millones de litros para el 2100.
- Hacia el 2100, se observan cambios importantes en la distribución espacial del agua para uso industrial. Veracruz se sigue manteniendo como el principal consumidor, pero en el caso de Quintana Roo se ubicaría en la categoría de la demanda “Muy alta”, debido a la expectativa de un mayor crecimiento del sector servicios. Por otra parte, entidades como Jalisco, Michoacán, Estado de México, Puebla y Tamaulipas pasarían a la categoría de una demanda “Alta”.
- Prácticamente, la demanda de agua para uso industrial tiende a concentrarse en el centro del país. En general, se observa además que la mayoría de las entidades mostrarán un aumento considerable en los niveles de consumo del recurso hídrico del sector industrial que se ubicará en la categoría de demanda “Media”.

**Gráfica 76. Proyección de la demanda de agua para uso industrial 2008-2100**



Los resultados de las proyecciones muestran, que bajo las condiciones actuales y de no registrarse cambios significativos en la política de tarifas y sin innovación tecnología hacia una mayor eficiencia en el uso del recurso hídrico, es decir bajo un escenario inercial (*Business as Usual* –BAU–) la demanda de agua para los diferentes sectores tiende a incrementarse en todas las entidades del país. Destacan, las regiones del noroeste, centro y golfo que muestran una situación de mayor consumo en todos los sectores alcanzando la categoría de una demanda “Muy alta” para el 2100. Esta situación puede ser más grave al considerarse los efectos del cambio climático atendiendo a una oferta hídrica relativamente constante o que muestra oscilaciones negativas afectando la disponibilidad.

## 6. IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN MÉXICO

Los impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos del país se documentan en diversos estudios. Por ejemplo, Mendoza *et. al.* (2006), con base en modelos de balance térmico hidrológico, realiza pronósticos para el año 2050 o 2075 sobre la vulnerabilidad en las zonas hidrológicas de México ante el cambio climático. Este estudio muestra que se podría ver beneficiado por un incremento en la escorrentía por habitante; sin embargo, la zona más poblada (cuenca del Pánuco) sufre una reducción en su escorrentía por habitante de 2.2 % derivado del elevado incremento poblacional. Asimismo, con un índice de vulnerabilidad del agua disponible muestra que la mayor parte del territorio mexicano tiene una alta vulnerabilidad, sólo excluyendo a las regiones hidrológicas I, II y III que permanecen sin vulnerabilidad. Así, el cambio climático tiene impactos en el régimen y la magnitud de la escorrentía, la humedad del suelo y la evaporación, así como en el grado de aridez de algunas zonas hidrológicas del país. Ibararán M. (2007) realiza una valoración económica para determinar el costo que el cambio climático impone a la agricultura y otros ecosistemas y sus implicaciones sobre el agua y la salud. Para evaluar los efectos sobre la disponibilidad de agua, se utiliza el método de costos inducidos sobre estimaciones de la forma en que el cambio climático afectará la disponibilidad de agua de distintas cuencas.

De esta manera, se evalúan las variaciones en el volumen del agua aprovechable tomando un valor de \$6 pesos/m<sup>3</sup>. Así, la pérdida económica total en las presas de Lerma-Chapala-Santiago, Río Pánuco y Río Balsas se estima entre 70 mil y 278 mil millones de pesos, dependiendo del modelo para pronóstico sobre la disponibilidad de agua. Martínez-Austria (2007) realiza una síntesis sobre el conocimiento actual de las implicaciones del cambio climático en México y las necesidades de adaptación en el ámbito de los recursos hídricos. Asimismo, presenta el resultado de estudios en colaboración con la CONAGUA donde se estima la disponibilidad de agua *per cápita* para el año 2025 sin considerar los efectos del cambio climático. El análisis muestra que sólo el crecimiento demográfico ocasionará una disminución importante en la disponibilidad de agua; así por ejemplo, en las regiones de la península de Baja California y del Río Bravo, cambiarán su clasificación de muy baja a extremadamente baja, lo que significa una disponibilidad por habitante inferior a 1,000 metros cúbicos anuales. Por último, el autor presenta una descripción cualitativa de los principales efectos del cambio climático en las diversas regiones hidrológico-administrativas de México considerando los cambios en la demanda de agua, la disponibilidad, escasez, huracanes y tormentas, sequías y los cambios en el nivel del mar. De esta forma se identifica que las regiones de: la Península de Baja California, Noroeste, Valle de México, Lerma Santiago-Pacífico, Cuencas Centrales del Norte y Río Bravo serán muy vulnerables a la escasez del recurso hídrico. Asimismo, presentarán ciertos grados de vulnerabilidad a la sequía y a la disponibilidad natural.

Elizondo (2004), Izazola (2001), Mazari-Hiriart *et al.* (1995) y Mazari-Hiriart *et al.* (2000) exploran la demanda futura de agua a partir del incremento en la demanda asociada al aumento de la población y la trayectoria del producto interno bruto (PIB). Las proyecciones muestran que, de no aumentar la eficiencia en el uso de agua, la presión sobre los recursos hídricos del país se incrementará entre 0.6 y 2.7%, dependiendo de la tasa de crecimiento del PIB, sin embargo los efectos serán diferentes por región. Destaca el caso de la región del Valle de México donde se estima un grado de presión para el recurso hídrico para el año 2000 de 126%, misma que pronostica que incluso aumentará entre 4 y 32% de no mejorar la eficiencia en el consumo de agua. Las distintas investigaciones concluyen, que aún sin considerar el fenómeno de cambio climático, se presentará una disminución en la disponibilidad y en consecuencia un mayor estrés en los recursos hídricos con un mayor impacto en las regiones del noroeste, en el centro del país principalmente en el Distrito Federal, el Estado de México, Jalisco y en Nuevo León. Sin embargo, bajo la presencia del cambio climático, este fenómeno se puede agudizar con elevados costos para el conjunto de la población.

Así, las variaciones en la temperatura media del planeta tendrán impactos en el ciclo hidrológico ya que influyen de manera decisiva en sus principales componentes como la precipitación y la evaporización, mismas que a su vez tienen efectos en el escurrimiento, en el contenido de humedad de los suelos y en la recarga de acuíferos (Martínez, 2007). Los escenarios climáticos proyectados para México permiten inferir ciertos efectos en los recursos hídricos. En efecto, siguiendo los resultados del IPCC (2007), el incremento en la temperatura, la mayor variabilidad en precipitación y la ubicación geográfica del país sugieren los siguientes impactos directos:

- El incremento en la variabilidad de la precipitación tendrá efectos adversos en la calidad del agua superficial y del subsuelo; ello debido a la contaminación de las aguas disponibles, con impactos importante en salud.
- Es probable que el incremento en las temperaturas disminuya la calidad del agua en lagos, a través de un incremento en la estabilidad térmica y alternando los patrones de mezclado, lo que resultará en una reducción de las concentraciones de oxígeno y un incremento en la liberación de fósforo proveniente de los sedimentos.
- En áreas áridas y semiáridas es probable que el cambio climático incremente la salinización en las aguas del subsuelo más superficiales debido a un incremento en la evapotranspiración.
- Elevadas temperaturas en el noroeste del país donde se concentra una parte importante de la actividad agrícola del país, conducirán a un incremento en la demanda de agua para riego, no obstante que la precipitación total durante la temporada de siembra y cosecha permanezca constante o se reduzca un poco.

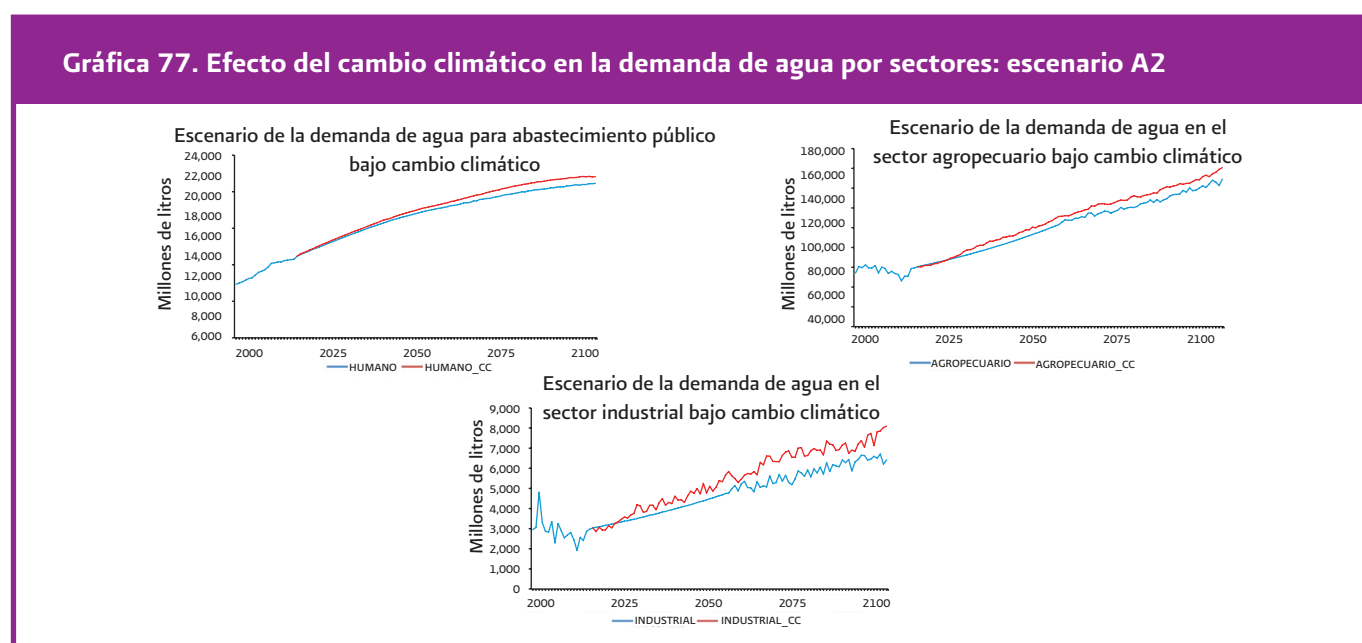
- En las áreas de costa, un incremento en los niveles del mar puede tener efectos negativos en el drenaje de aguas pluviales y en la eliminación de aguas residuales e incrementar el potencial para la intrusión de agua salada en el agua dulce en los acuíferos de las costas, afectando de esta manera los recursos hídricos del subsuelo.
- Se esperan cambios en la oferta de agua en las distintas regiones del país y en consecuencia un deterioro en la disponibilidad del recurso hídrico.

El análisis del impacto del cambio climático sobre los recursos hídricos del país se realizó atendiendo a la oferta y la demanda del recurso hídrico. La demanda de agua se considera a nivel nacional para cada uno de los tres sectores (consumo humano, agropecuario e industrial) y se estimó como función de la temperatura media para cada estado de acuerdo a la ecuación (12). En principio, se espera un efecto positivo de la temperatura en el consumo de agua (Thomas, 2008; Easterling *et al.*, 2000; Tudhope *et al.*, 2001; Douville *et al.*, 2002; Arnell, 2004; Thomson *et al.*, 2005; Jenerette y Larsen, 2006).

$$(12) \quad carga_t = \beta_0 + \beta_1 tem_t u_t$$

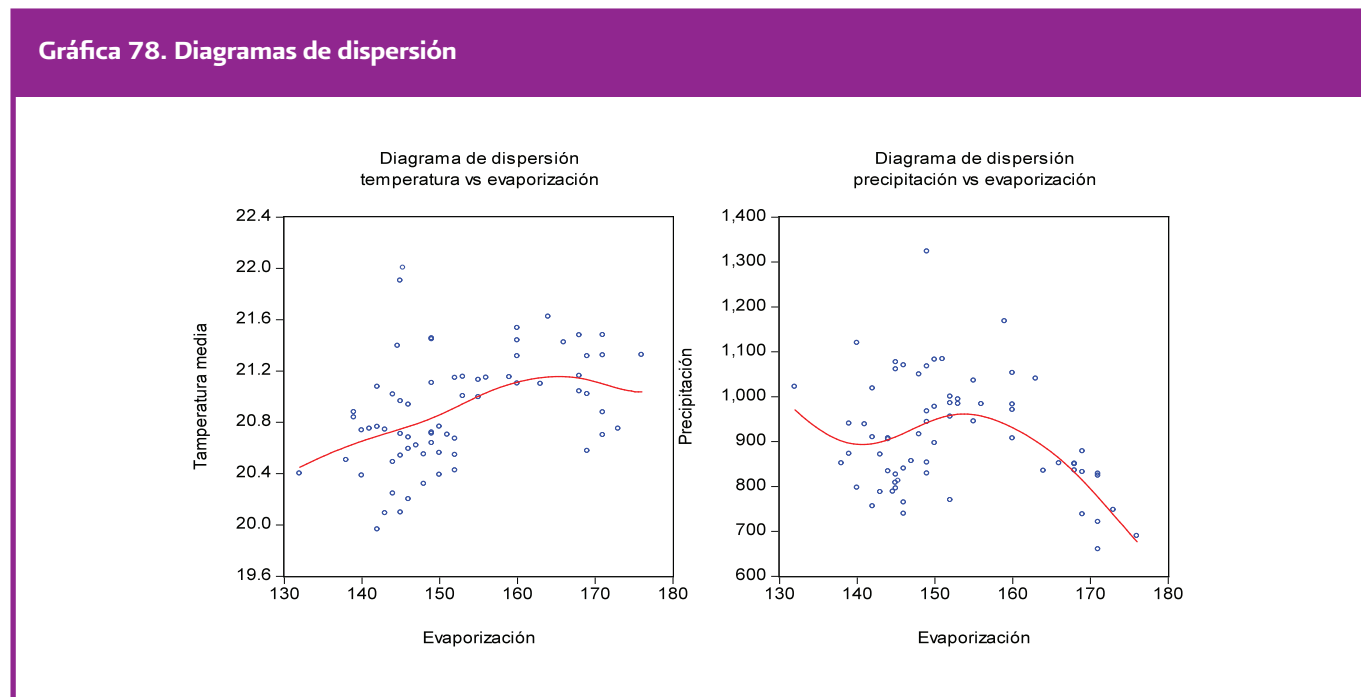
Los resultados a nivel sectorial de esta función de demanda indican que:

- Se espera una disminución de la disponibilidad natural de agua del orden de entre 2% y 5.2% hacia el 2100.
- El valor extremo se reporta en el escenario A2 con un mayor incremento en la temperatura y una mayor disminución en la precipitación para cada uno de los Estados del país.
- En principio se espera una reducción de la oferta del recurso hídrico, sin embargo los resultados están sujetos a un alto grado de incertidumbre.
- En lo que se refiere al consumo en los diferentes sectores (Gráfica 77), y considerando el escenario A2, el consumo humano crecería en prácticamente 5% más respecto a su trayectoria esperada.
- La demanda para el sector agropecuario tiene un incremento de hasta el 7% hacia finales del presente siglo sobre el escenario base.
- El sector industrial muestra un aumento en la demanda de 6%.
- Asimismo las simulaciones muestran una enorme volatilidad por lo que existe un grado de incertidumbre significativo sobre los resultados obtenidos.



Respecto a la oferta de agua, resulta en extremo complicado identificar el posible impacto de la temperatura sobre la disponibilidad natural del recurso hídrico ya que en ella influyen una gran cantidad de parámetros relacionados con el ciclo hidrológico. En efecto, Gedney et al. (2006) muestran que el incremento en las concentraciones de CO<sub>2</sub>, a nivel global están asociadas con una reducción de la transpiración. Por su parte, Kruij et al. (2008), concluyen para Holanda que las concentraciones de CO<sub>2</sub> reducen la evapotranspiración aunque de forma moderada (aproximadamente 5% en 50 años y 15% en 100 años). Flower, et al. (2007) y Ekström, et al., (2005) muestran que el cambio climático impacta la disponibilidad del recurso hídrico realizando estimaciones del nivel de evapotranspiración. En este sentido existe patrones regulares entre los niveles de precipitación, evaporación y la temperatura (Komatsu, et al., 2008) que puede ser aprovechada para medir el impacto del cambio climático en la disponibilidad. Así, para estimar el impacto del cambio climático en la disponibilidad de agua se aprovecho la relación entre los niveles de precipitación, evaporación y la temperatura.

Los resultados obtenidos muestran que la disponibilidad de agua mantiene una relación positiva con el nivel de precipitación, en tanto que la temperatura registra una elasticidad negativa lo que indica que un aumento en la temperatura disminuye la disponibilidad (Gráfica 78). Estos resultados son consistentes pero deben de tomarse con cierta precaución, toda vez que es sólo una aproximación al fenómeno y el tamaño de la muestra no permite obtener resultados concluyentes.



De este modo, una aproximación para identificar los potenciales efectos del cambio climático en la disponibilidad es posible obtenerla a través de estimar un modelo econométrico con datos panel que considera la disponibilidad natural para cada una de las 13 regiones hidrológicas<sup>25</sup> del país como una función de la temperatura y la precipitación.

$$(13) \quad dis_{it} = \beta_0 + \beta_1 prec_{it} + \beta_2 tem_{it} + u_{it}, \text{ para } i = 1, 2, \dots, 13 \text{ y } T = 1999-2007$$

<sup>25</sup> De acuerdo a la clasificación de CONAGUA.



Donde  $dis_{it}$  es la disponibilidad natural,  $tem_{it}$  la temperatura media y  $prec_{it}$  la precipitación anual para cada una de las cuencas. Las series fueron transformadas en logaritmo natural, por lo tanto los coeficientes estimados representan una medida de la elasticidad. La estimación utiliza el método de efectos aleatorios (Hsiao, 2003), los resultados se presentan en el Cuadro 28. La prueba de Hausman (1978) indica que no se rechaza la hipótesis nula,  $X^2(2) = 33.72 [0.00]$ , por lo que no se rechaza la especificación de efectos aleatorios. (Hsiao, 2003), los resultados se presentan en el Cuadro 28. La prueba de Hausman (1978) indica que no se rechaza la hipótesis nula,  $X^2(2) = 33.72 [0.00]$ , por lo que no se rechaza la especificación de efectos aleatorios. aproximación para identificar los potenciales efectos del cambio posible obtenerla a través de estimar un modelo econométrico con disponibilidad natural para cada una de las 13 regiones hidrológicas<sup>4</sup> del temperatura y la precipitación: , para  $i = 1, 2, \dots, 13$  y  $T = 1999-2007$  disponibilidad natural,  $tem_{it}$  la temperatura media y  $prec_{it}$  la precipitación cuencas. Las series fueron transformadas en logaritmo natural.

## CUADRO 28. RESULTADOS DE LA ESTIMACIÓN DE DATOS PANEL

Variable	Coeficiente	Estadístico-t	Prob.
C	9.880986	9.372756	0.0000
$prec_{it}$	0.204663	2.192491	0.0302
$temp_{it}$	-0.443515	-1.671000	0.0972
Efectos aleatorios			
_I—C	-1.182322		
_II—C	-0.755295		
_III—C	0.225068		
_IV--C	0.163793		
_V—C	0.422187		
_VI--C	-0.329646		
_VII--C	-1.041194		
_VIII--C	0.458989		
_IX—C	0.078785		
_X—C	1.401400		
_XI—C	1.939450		
_XII--C	0.430087		
_XIII--C	-1.811303		

De esta manera, con base en los escenarios de precipitación y temperatura a nivel estatal, es posible entonces estimar los impactos en la disponibilidad natural con base en las elasticidades obtenidas con los datos panel. Con base en el nivel de disponibilidad y consumo se calcula el índice de vulnerabilidad y los costos asociados. Los resultados a nivel estatal se reportan en el Cuadro 29, considerando los escenarios de emisiones B1, A1B y el A2 del IPCC. En los tres casos se proyecta un aumento en la temperatura y una ligera disminución de la precipitación media anual. De este modo, las proyecciones indican que se puede esperar una disminución de la disponibilidad natural de agua del orden de 2% y hasta 5.2% hacia el 2100. El valor extremo se reporta en el escenario A2 con un mayor incremento en la temperatura y una mayor disminución en la precipitación para cada uno de los Estados del país.

En principio se espera una reducción de la oferta del recurso hídrico, sin embargo, los resultados están sujetos a un alto grado de incertidumbre debido a que los cambios en la disponibilidad se realizaron con base en las elasticidades resultantes del modelo de datos panel y además los escenarios de temperatura y precipitación están sujetos a un nivel de incertidumbre importante. No obstante ello, los resultados permiten definir ciertas trayectorias base que pueden ayudar a delimitar los riesgos potenciales asociados a una creciente demanda del recurso hídrico y a una potencial disminución de la oferta ocasionada por el cambio climático.

## CUADRO 29. CAMBIOS EN LA DISPONIBILIDAD NATURAL POR ESTADO (HECTÓMETROS CÚBICOS HM<sup>3</sup>)

Estados	Promedio	B1	A1B	A2
Aguascalientes	1,020	979 (-4.02)	980 (-3.92)	952 (-6.66)
Baja California	2,162	2105 (-2.63)	2083 (-3.65)	2050 (-5.18)
Baja California Sur	2,438	2375 (-2.58)	2366 (-2.95)	2321 (-4.79)
Campeche	14,717	14228 (-3.32)	14211 (-3.43)	13831 (-6.02)
Chiapas	115,160	112480 (-2.33)	112292 (-2.49)	110130 (-4.36)
Chihuahua	11,744	11205 (-4.58)	11165 (-4.93)	10877 (-7.38)
Coahuila	5,176	4992 (-3.55)	5014 (-3.12)	4903 (-5.27)
Colima	1,020	990 (-2.94)	990 (-2.94)	969 (-5.00)
Distrito Federal	271	260 (-4.05)	259 (-4.42)	252 (-7.01)
Durango	11,364	10933 (-3.79)	10942 (-3.71)	10659 (-6.20)
Guanajuato	5,273	5061 (-4.02)	5068 (-3.88)	4927 (-6.56)
Guerrero	17,532	16971 (-3.19)	16979 (-3.15)	16652 (-5.01)
Hidalgo	4,808	4639 (-3.51)	4630 (-3.70)	4533 (-5.71)
Jalisco	14,027	13594 (-3.08)	13596 (-3.07)	13287 (-5.27)
Estado de México	3,939	3781 (-4.01)	3771 (-4.26)	3670 (-6.82)
Michoacán	10,718	10340 (-3.52)	10341 (-3.52)	10097 (-5.79)
Morelos	851	822 (-3.40)	819 (-3.76)	802 (-5.75)
Nayarit	4,858	4715 (-2.94)	4706 (-3.12)	4604 (-5.22)
Nuevo León	2,396	2313 (-3.46)	2327 (-2.87)	2278 (-4.92)
Oaxaca	55,673	54251 (-2.55)	53973 (-3.05)	53092 (-4.63)
Puebla	16,978	16358 (-3.65)	16308 (-3.94)	15920 (-6.23)
Querétaro	2,390	2293 (-4.05)	2296 (-3.93)	2236 (-6.44)

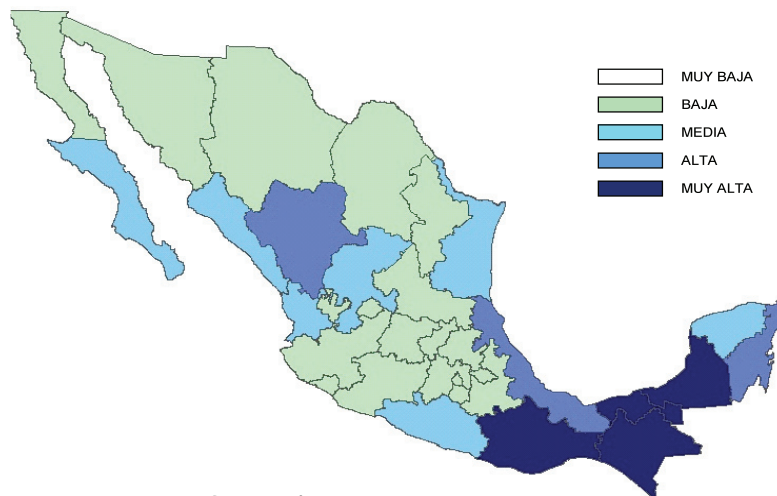
## CUADRO 29. CAMBIOS EN LA DISPONIBILIDAD NATURAL POR ESTADO (HECTÓMETROS CÚBICOS HM<sup>3</sup>) (CONTINUACIÓN)

Estados	Promedio	B1	A1B	A2
Quintana Roo	9,783	9492 (-2.97)	9468 (-3.21)	9218 (-5.77)
San Luis Potosí	7,063	6761 (-4.27)	6776 (-4.06)	6589 (-6.71)
Sinaloa	10,016	9710 (-3.05)	9651 (-3.64)	9417 (-5.98)
Sonora	6,911	6699 (-3.06)	6669 (-3.50)	6495 (-6.01)
Tabasco	37,861	36714 (-3.02)	36591 (-3.35)	35735 (-5.61)
Tamaulipas	12,550	12436 (-0.90)	12382 (-1.33)	12179 (-2.95)
Tlaxcala	729	697 (-4.38)	694 (-4.80)	675 (-7.40)
Veracruz	60,374	58631 (-2.88)	58470 (-3.15)	57349 (-5.01)
Yucatán	8,301	8092 (-2.51)	8080 (-2.66)	7888 (-4.97)
Zacatecas	7,038	6733 (-4.33)	6749 (-4.10)	6571 (-6.63)
Total	465,139	451,651	450,644	441,157
Variación porcentual		(-2.89)	(-3.11)	(-5.15)

Nota: Los valores entre paréntesis indican la variación porcentual con respecto al promedio.

Un indicador general para estimar el grado de utilización del recurso hídrico es la disponibilidad natural *per cápita* que se aproxima como un cociente de la disponibilidad natural media, que es la oferta de agua para las distintas regiones hidrológicas, con respecto al tamaño de la población. Ello se expresa en términos de metros cúbicos por habitante. El Mapa 4, presenta la distribución espacial de la disponibilidad natural *per cápita* para el año de 2007, clasificada de acuerdo al trabajo de Martínez-Austria (2007) y definida por la Organización de las Naciones Unidas (ONU). Esta escala considera a la disponibilidad de agua como baja de ubicarse entre 2,001 y 5,000 m<sup>3</sup>/hab/año, muy baja si se ubica entre 1,001 a 2,000 m<sup>3</sup>/hab/año y extremadamente baja cuando se registran menos de 1,000 m<sup>3</sup>/hab/año.

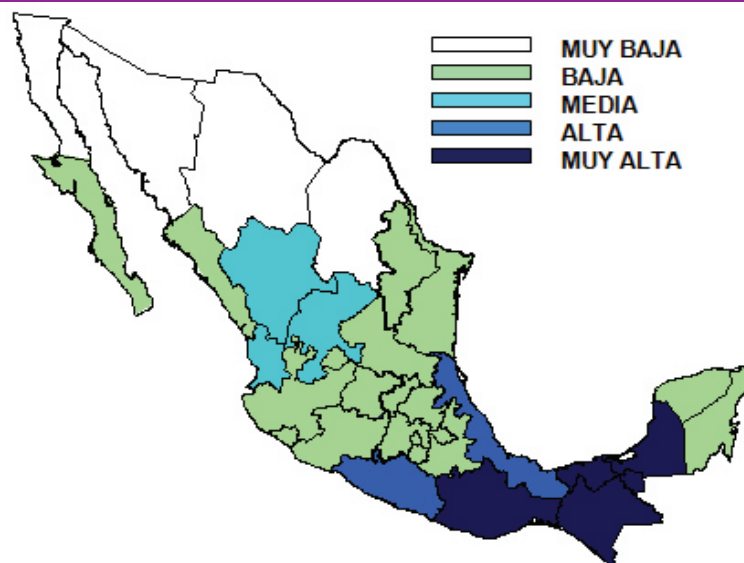
#### Mapa 4. Disponibilidad del agua per cápita en 2007



Fuente: elaboración propia con base en información de la CONAGUA

Así, el sureste del país (Tabasco, Chiapas y Oaxaca) se puede clasificar como una región con muy alta disponibilidad, dado los niveles de precipitación en tanto que los Estados del norte y centro del país, que es la gran mayoría del territorio nacional, se clasifica con una disponibilidad baja (17 Estados), donde además se concentra la mayor demanda de agua por sus distintos usos como el humano, agropecuario e industrial. Sin embargo, esta medida no permite identificar el grado de estrés hídrico y la forma en que el cambio climático puede afectar la oferta del recurso hídrico. Así, por ejemplo, considerando, exclusivamente el crecimiento de la población al 2100, es posible representar a nivel estatal la disponibilidad *per cápita* (Mapa 5) bajo el supuesto de que la disponibilidad media natural de agua no se modifica.

#### Mapa 5. Disponibilidad del agua per cápita en 2010



Fuente: elaboración propia con base en información de la CONAGUA y CONAPO

De este modo, se observa que se presentan cambios sustanciales al comparar los resultados al 2100, los Estados del norte del país (Baja California, Sonora, Chihuahua y Coahuila) reportan una disponibilidad “Muy Baja”, en general la mayoría de las entidades del país reportan una disminución en la disponibilidad *per cápita*; de hecho al 2100, 18 Estados se ubicarían en la categoría de una disponibilidad “Baja”, lo que significaría que las dos terceras partes del territorio nacional se ubicarían en condiciones de mayor estrés hídrico, concentrándose principalmente en la región centro norte. Respecto al escenario base de 2007; el Estado de Yucatán pasa de la categoría de disponibilidad “Media” a disponibilidad “Baja”, en tanto que el resultado más grave es para el caso de Quintana Roo, que pasa de una clasificación de disponibilidad alta a disponibilidad baja. Esto debido al crecimiento esperado en el sector servicios.

Sin embargo, el indicador de la disponibilidad *per cápita* no permite identificar claramente los impactos asociados al cambio climático ya que pondera en mayor medida la dinámica de la población. En este sentido, en años recientes, diversas investigaciones han planteado diferentes aproximaciones en la medición de los impactos del cambio climático en los recursos hídricos.

Los resultados de la disponibilidad natural y la demanda de agua, junto con los cambios en temperatura y precipitación debidos al cambio climático, permiten estimar un índice de vulnerabilidad en el consumo de agua (Mendoza *et al.*, 2006) que se define como:

$$(14) \quad I_t = (CONA_t/Q)*100$$

Donde  $I_t$  = Valor del Índice para el año  $t$ ;  $CONA_t$  = el consumo total de agua del año  $t$ ;  $Q$  = es la disponibilidad natural. Así, Mendoza *et al.* (2006) proponen la siguiente clasificación:

- $I_t < 20\%$  No vulnerable
- $20\% < I_t < 50\%$  Vulnerabilidad baja
- $50\% < I_t < 75\%$  Vulnerabilidad moderada
- $I_t > 75\%$  Vulnerabilidad alta

Las variaciones entre el escenario de 2007 y el escenario de 2050 y 2100 con cambio climático permiten obtener un rango de variación del posible incremento en el índice de vulnerabilidad, con un 60% de probabilidad, utilizando como base el promedio de la disponibilidad bajo los tres escenarios de emisiones y una distribución normal (Cuadro 30) donde se reportan los siguientes resultados:

- Aún sin considerar el cambio climático, se espera un aumento en la vulnerabilidad de todas las entidades del país, siendo las regiones del centro y el pacífico norte las que registrarán un mayor grado de vulnerabilidad.
- El efecto de cambio climático no modifica la tendencia del índice de vulnerabilidad pero lo refuerza.
- Los casos más graves serían las entidades como el Distrito Federal donde su consumo en 2050 sería 4.9 veces mayor a su disponibilidad y para el año 2100 se eleva a 5.8 veces mayor. Colima, es otra entidad con alto grado de vulnerabilidad, donde su demanda sería del doble de su disponibilidad para el año 2050 y más del triple para el año 2100.
- En una situación crítica también están los Estados del noroeste Sinaloa, Sonora y Baja California, así como Morelos, Estado de México, Guanajuato, Nuevo León, Tamaulipas y Chihuahua que se ubican en la categoría de muy alta vulnerabilidad, de acuerdo al índice estimado.

Así, el índice de vulnerabilidad tiende a incrementarse en todas las entidades del país. Sin embargo, para identificar el grado de riesgo asociado a los efectos del cambio climático se pueden aplicar las Simulaciones Monte Carlo (Sparado y Rabl, 1998a y 1998b). Esta técnica permite definir una distribución de probabilidad para cada resultado del índice de vulnerabilidad y de esta manera disponer de rangos de variación de los resultados. La Gráfica 79 presenta los resultados de la Simulación Monte Carlo del índice de vulnerabilidad, para un conjunto de entidades que sufrirán mayor impacto ante los cambios en la temperatura y en la disponibilidad natural del agua considerando el año de 2050.

Es importante señalar que se considera una distribución del índice sin incluir el cambio climático y una segunda distribución con el impacto de cambio climático. La diferencia entre ambas distribuciones muestra el grado de riesgo en cada entidad.

### CUADRO 30. ÍNDICE DE VULNERABILIDAD POR ESTADO

Estado	I <sub>t</sub> en 2007	I <sub>t</sub> en 2050 sin cambio climático	I <sub>t</sub> en 2050 con cambio climático	I <sub>t</sub> en 2100 sin cambio climático	I <sub>t</sub> en 2100 con cambio climático
Aguascalientes	62	93	98	112	120
Baja California	135	172	179	205	216
Baja California Sur	16	36	37	46	49
Campeche	4	9	9	15	16
Chiapas	1.5	4	4	6	6
Chihuahua	44	69	73	88	95
Coahuila	36	58	60	91	96
Colima	162	215	224	331	349
Distrito Federal	419	491	518	589	634
Durango	14	21	22	28	29
Guanajuato	78	144	151	208	223
Guerrero	7	8	8	9	10
Hidalgo	47	64	67	80	85
Jalisco	26	44	46	49	52
Estado de México	70	94	99	114	122
Michoacán	47	65	68	96	102
Morelos	145	187	195	230	244
Nayarit	25	38	40	61	64
Nuevo León	85	161	168	373	392
Oaxaca	2	3	3	5	5
Puebla	15	20	21	26	28
Querétaro	43	62	65	83	88
Quintana Roo	4	11	11	11	11
San Luis Potosí	19	27	28	37	40
Sinaloa	93	165	173	203	217
Sonora	109	182	190	289	308
Tabasco	1	2	2	3	3
Tamaulipas	30	77	78	127	131
Tlaxcala	40	61	64	72	78
Veracruz	7	13	13	16	17
Yucatán	13	27	28	38	40
Zacatecas	21	25	27	27	29

Como se observa para el caso del Distrito Federal, el riesgo se incrementa de manera considerable atendiendo al fuerte desplazamiento hacia la derecha de la distribución bajo el escenario del cambio climático. En efecto, sin cambio climático, a un nivel de probabilidad del 5% (como una medida del riesgo), el índice de vulnerabilidad se podría ubicar en un valor de 507, es decir existe el riesgo de que la vulnerabilidad en el Distrito Federal podría incrementarse hasta en un 21% hacia el 2050; sin embargo, en un escenario con cambio climático la vulnerabilidad se incrementaría hasta en 27%. En otras entidades el desplazamiento de la distribución del índice bajo cambio climático no es tan intenso como en el Distrito Federal, aunque se observa un aumento en el riesgo de una mayor vulnerabilidad ante la presencia de un cambio climático.

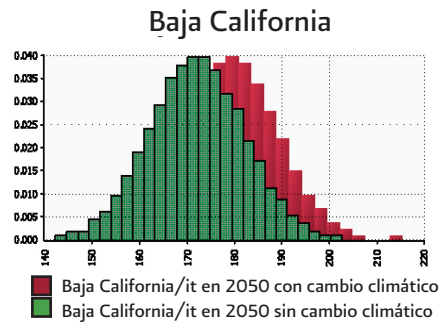
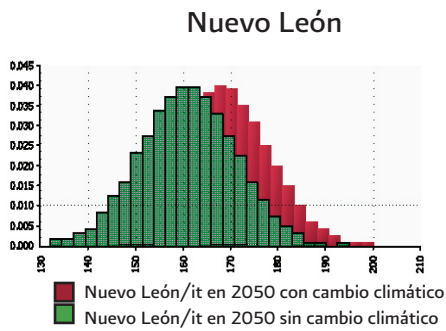
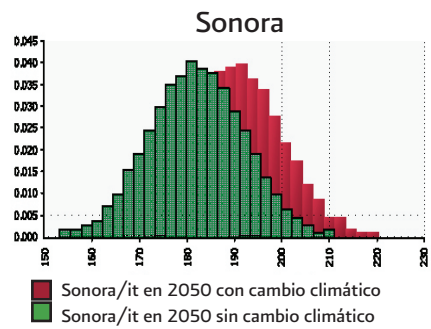
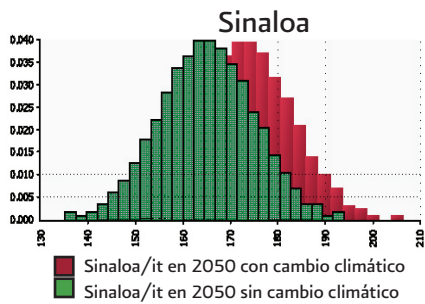
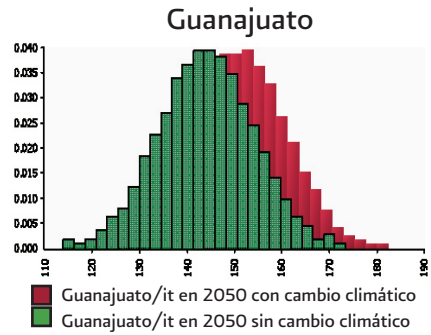
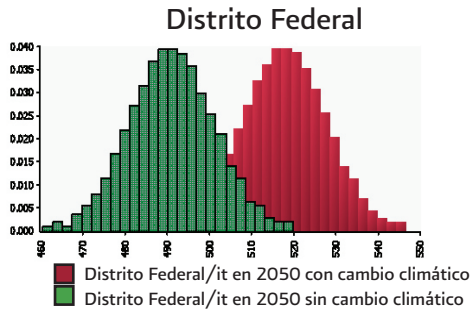
Así, por ejemplo, en Baja California, Sinaloa y Sonora se observa que las colas de la distribución se extienden hacia la derecha indicando un aumento del riesgo de una mayor vulnerabilidad. En contraste entidades como Nuevo León y Guanajuato muestran que, no obstante que la distribución con cambio climático se desplaza hacia la derecha, las colas de la distribución no se extienden demasiado.

En este sentido y con el propósito de obtener una medida del impacto de un aumento en la temperatura media y una disminución en la precipitación, en el grado de vulnerabilidad de los recursos hídricos se realizaron Simulaciones Monte Carlo para cada una de las entidades del país considerando ambos escenarios (con y sin cambio climático).

Con estos resultados se definieron bandas de probabilidad al 60% y se compararon ambas distribuciones de donde se obtuvo una tasa de variación, de modo que se dispone de una medida porcentual del impacto del cambio climático en la vulnerabilidad hídrica.

Así, se observa que, considerando el límite superior al 2050, 10 entidades incrementarían su vulnerabilidad en un valor de 6% a 7%, en tanto que 16 entidades reportarían un incremento del 5%, respecto al nivel de 2007 (Cuadro 31). Al 2100, la vulnerabilidad se incrementaría hasta en 10% y 11% en nueve entidades destacando Tlaxcala, Chihuahua, Distrito Federal, Estado de México, San Luis Potosí, Aguascalientes, Zacatecas, Guanajuato y Querétaro. En tanto que los Estados del norte como Durango, Sonora, Sinaloa, Coahuila y Baja California se incrementaría en un 9% respecto al nivel de 2007.

**Gráfica 79. Simulación Montecarlo del índice de vulnerabilidad con cambio climático al 2050**



Fuente: Con base en información de CONAGUA Estadísticas del Agua en México 2007



## CUADRO 31. VARIACIÓN EN EL GRADO DE VULNERABILIDAD ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO (PORCENTAJE)

Estado	Variación debida al Cambio Climático			
	2050		2100	
	Límite inferior	Límite superior	Límite inferior	Límite superior
Aguascalientes	4.65	5.74	4.33	10.1
Baja California	3.55	4.66	3.3	7.71
Baja California Sur	3.17	4.3	3.09	7.22
Campeche	3.93	5.08	3.83	8.94
Chiapas	2.66	3.78	2.73	6.38
Chihuahua	5.45	6.68	4.82	11.26
Coahuila	3.71	4.88	3.39	7.92
Colima	3.26	4.43	3.18	7.42
Distrito Federal	4.98	6.11	4.54	10.59
Durango	4.33	5.43	3.99	9.32
Guanajuato	4.58	5.72	4.24	9.9
Guerrero	3.38	4.56	3.18	7.42
Hidalgo	4.05	5.18	3.66	8.54
Jalisco	3.44	4.61	3.38	7.88
Estado de México	4.79	6.01	4.41	10.29
Michoacán	4	5.1	3.72	8.67
Morelos	4.02	5.18	3.68	8.58
Nayarit	3.35	4.56	3.32	7.74
Nuevo León	3.37	4.55	3.14	7.32
Oaxaca	3.03	4.21	2.92	6.81
Puebla	4.34	5.5	4.01	9.36
Querétaro	4.57	5.65	4.14	9.66
Quintana Roo	3.6	4.77	3.69	8.62
San Luis Potosí	4.8	5.97	4.34	10.12
Sinaloa	3.97	5.16	3.87	9.02
Sonora	3.96	5.11	3.9	9.11
Tabasco	3.7	4.83	3.59	8.38
Tamaulipas	1.29	2.48	1.87	4.37
Tlaxcala	5.29	6.54	4.84	11.28
Veracruz	3.37	4.52	3.22	7.51
Yucatán	3.02	4.13	3.16	7.38
Zacatecas	4.8	5.95	4.27	9.96

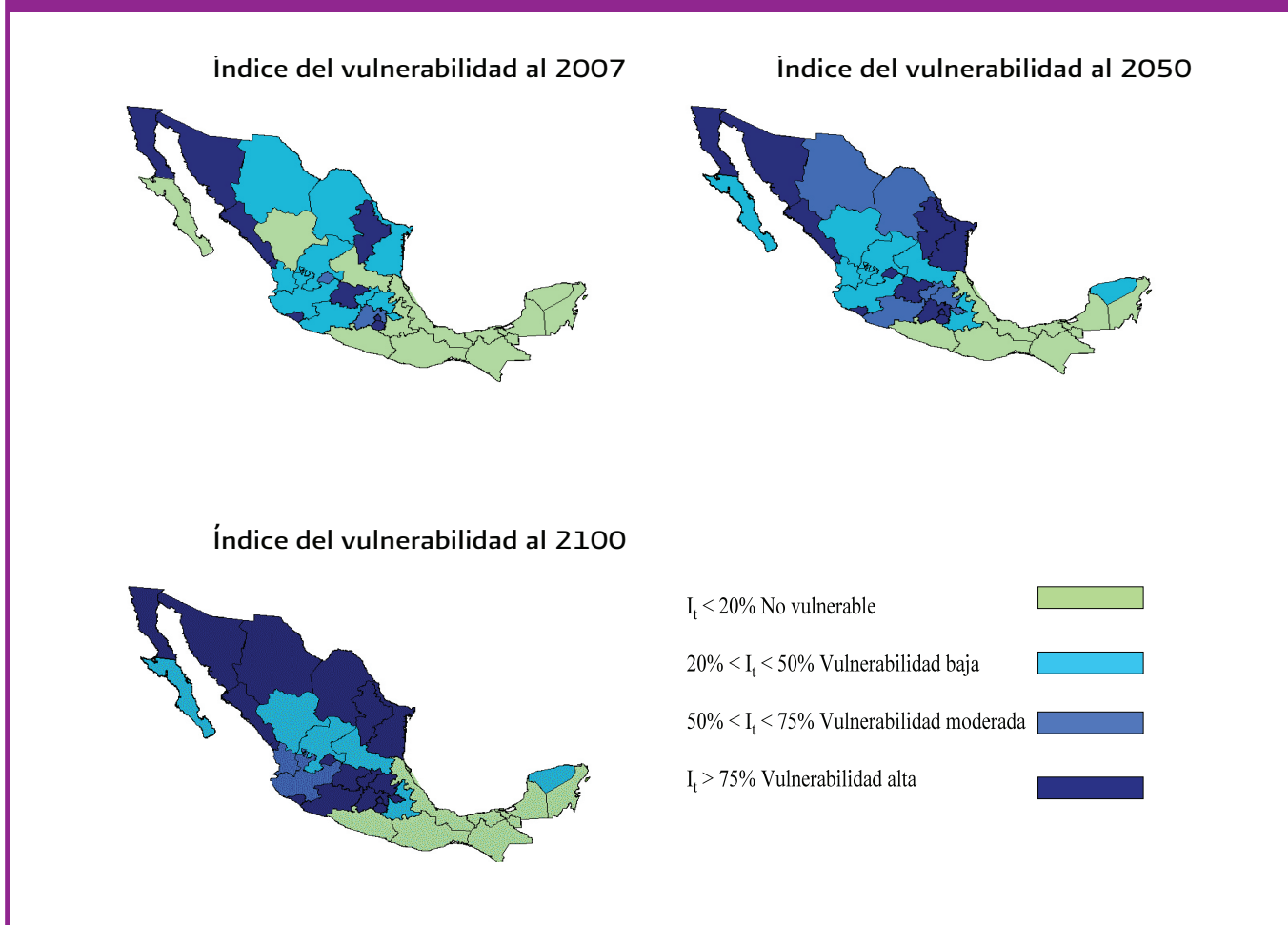
La expresión espacial del índice de vulnerabilidad a nivel de entidades, considerando el 2007, el 2050 y el 2100 se presenta en el Mapa 6. En este caso se observa que actualmente las entidades ubicadas en la categoría de “vulnerabilidad alta” están en el pacífico norte tales como Baja California, Sonora y Sinaloa, además, se incluyen el Distrito Federal y el Estado de México donde se concentra la principal zona urbana del país. Otras entidades muestran, una vulnerabilidad alta como los Estados de Nuevo León, Colima y Guanajuato.

En contraste 11 entidades, principalmente ubicadas en el sur del país se clasifican en la categoría de “No vulnerables” y 10 en “Vulnerabilidad baja”, de tal manera que sólo una tercera parte del territorio no se encuentra en riesgo. Sin embargo, conforme aumenta la demanda por los recursos hídricos y se agudizan los efectos del cambio climático, la distribución espacial del índice de vulnerabilidad podría modificarse de manera crítica hacia una mayor vulnerabilidad. Para el 2050, los Estados del sureste, con excepción de Yucatán, se clasificarán con una vulnerabilidad muy baja en contraste el noroeste del país (Baja California, Sonora y Sinaloa) que se ubica en una categoría de vulnerabilidad muy alta y donde el cambio climático puede incrementar su vulnerabilidad entre 3.8% y 4.9%. Los Estados ubicados en el centro del territorio nacional también se verán muy afectados, destacando, con una muy alta vulnerabilidad, al Distrito Federal, Estado de México y Morelos con un impacto en su vulnerabilidad que podría ubicarse entre 4.6% y 5.8%. Por su parte, Nuevo León y Tamaulipas también muestran una muy alta vulnerabilidad que podría incluso aumentar entre 2.3% y 3.5%. El resto de las entidades con muy alta vulnerabilidad (Colima, Guanajuato y Aguascalientes) muestran que podrían aumentarla entre 4.2% y 5.3% como consecuencia del cambio climático.

Las entidades con alta vulnerabilidad se ubican en dos regiones del país. Por un lado, Michoacán, Querétaro, Hidalgo y Tlaxcala donde se espera un aumento en la vulnerabilidad para el año 2050 de entre 4.5% a 5.6% respecto a 2007. Por el otro lado, dos entidades del norte del país, Chihuahua y Coahuila, muestran un rango promedio de aumento de la vulnerabilidad de 4.6% a 5.8% para el mismo período. Los Estados de la frontera norte incrementarán su vulnerabilidad en términos del consumo y disponibilidad del recurso hídrico en niveles de 3.6% a 4.7%. Por su parte, los Estados del centro del país pueden registrar una mayor vulnerabilidad estimada en un aumento de entre 4.6% a 5.8% dada la expansión de los centros urbanos y la producción agrícola.

En las proyecciones hacia el 2100, esta tendencia se agudiza, donde 17 entidades del país se ubicarán en la categoría de “Vulnerabilidad alta”, es decir la mitad del territorio del país estaría en una condición crítica en términos de los recursos hídricos. De hecho se espera que bajo la presencia del cambio climático, este conjunto de entidades incremente su vulnerabilidad, hacia el 2100, entre 5 y 7.5%. Las regiones del norte y del centro del país serán las más afectadas. En el 2100 sólo siete entidades del país se ubicarían en la categoría de “No vulnerables” (Campeche, Chiapas, Guerrero, Oaxaca, Quintana Roo, Tabasco y Veracruz), sin embargo dado la magnitud del índice las entidades de Campeche, Veracruz y Quintana Roo, mostrarían un mayor riesgo y podrían ubicarse en el categoría de “Vulnerabilidad baja”. En general se observa un mayor riesgo de vulnerabilidad bajo la presencia del cambio climático afectando prácticamente a un 87% del territorio con distintos grados de intensidad y riesgo.

Mapa 6. índice de vulnerabilidad en 2100 bajo la presencia del cambio climático



## 7. UNA APROXIMACIÓN A LOS COSTOS DEL AGUA

### 7.1 COSTOS ASOCIADOS AL CAMBIO CLIMÁTICO

La aproximación a los costos asociados al cambio climático se realizó atendiendo a la trayectoria de la demanda de agua para cada sector. De tal manera, los costos indicarían la cantidad de recursos que deberán invertirse para garantizar el abastecimiento adicional del recurso hídrico bajo un cambio en la temperatura media.

#### COSTOS DE ABASTECIMIENTO PÚBLICO

Los costos de producción del agua por entidad federativa para consumo humano se obtuvieron del informe sobre la Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento edición 2007, utilizando datos para el 2006<sup>26</sup> (Cuadro 32).

<sup>26</sup> En dicho informe se reporta el volumen de agua producido por entidad federativa y los egresos totales de los prestadores de servicios por el proceso de producción, lo que considera salarios, mantenimiento y operación. De esta manera, se presenta el costo unitario de producción en pesos por metro cúbico (\$/m<sup>3</sup>), aproximado como el cociente de los egresos totales respecto al volumen total de agua producida en el año. Se obtuvo entonces el costo unitario de producción del agua de los principales municipios reportados en el informe con una población mayor a 50 mil habitantes. Así, de dichos municipios se obtuvo el promedio de sus costos, con lo que se generó una serie de costos de suministro de agua por m<sup>3</sup> por entidad federativa. Es importante señalar que al considerar el costo para aquellos municipios que tienen una mayor población se está considerando el costo del suministro de agua para la mayor parte de la población.

## CUADRO 32. COSTOS DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO 2006

Estado	Costo de Producción (\$/m <sup>3</sup> )	Estado	Costo de Producción (\$/m <sup>3</sup> )
Aguascalientes	3.40	Morelos	3.00
Baja California	10.11	Nayarit	2.42
Baja California Sur	1.18	Oaxaca	1.44
Campeche	1.49	Nuevo León	3.77
Chiapas	3.32	Puebla	4.17
Chihuahua	3.56	Querétaro	7.10
Coahuila	3.34	Quintana Roo	4.46
Colima	4.69	San Luis Potosí	3.11
Distrito Federal	7.42	Sinaloa	4.66
Durango	2.93	Sonora	3.83
Guanajuato	3.43	Tabasco	3.28
Guerrero	3.63	Tamaulipas	6.22
Hidalgo	3.34	Tlaxcala	2.52
Jalisco	2.32	Veracruz	2.88
Estado de México	3.00	Yucatán	2.12
Michoacán	2.20	Zacatecas	3.72

A fin de contar con una trayectoria de los costos del suministro de agua para consumo humano a futuro se estimó una ecuación de corte transversal con datos para las 32 entidades de la república para el 2006:

$$(15) \quad C_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + u_i$$

Donde  $C_i$  representa el costo de producción por m<sup>3</sup> de agua para consumo humano,  $\beta_0$  representa una constante en los costos de producción de agua para consumo humano que no depende de la entidad federativa ni del nivel de consumo,  $\beta_1$  que captura las variaciones en el costo de producción de agua de acuerdo a los niveles de consumo ( $X_i$ ) y finalmente  $u_i$  captura el efecto de otros factores estocásticos que influyen en el costo de producción. Los parámetros obtenidos son:

$$(16) \quad C_i = 3.2711 + 3.1696 e^{-10 * X_i}$$

De este modo, los costos unitarios de producción de agua pronosticados para 2050 y al 2100 (a precios de 2006) son los siguientes:

## CUADRO 33. ESTIMACIÓN DE LOS COSTOS ASOCIADOS AL CONSUMO DE AGUA PARA USO HUMANO

Estado	Costo de Producción (\$/m <sup>3</sup> )		Estado	Costo de Producción (\$/m <sup>3</sup> )	
	2050	2100		2050	2100
Aguascalientes	3.6	3.6	Morelos	3.7	3.8
Baja California	10.7	10.8	Nayarit	3.5	3.5
Baja California Sur	3.4	3.4	Oaxaca	3.7	3.9
Campeche	3.5	3.6	Nuevo León	4.3	4.4
Chiapas	3.8	3.9	Puebla	4.5	4.7
Chihuahua	4.1	4.0	Querétaro	7.6	7.6
Coahuila	3.6	3.6	Quintana Roo	4.8	4.9
Colima	4.8	4.8	San Luis Potosí	3.7	3.9
Distrito Federal	8.6	8.9	Sinaloa	5.1	5.1

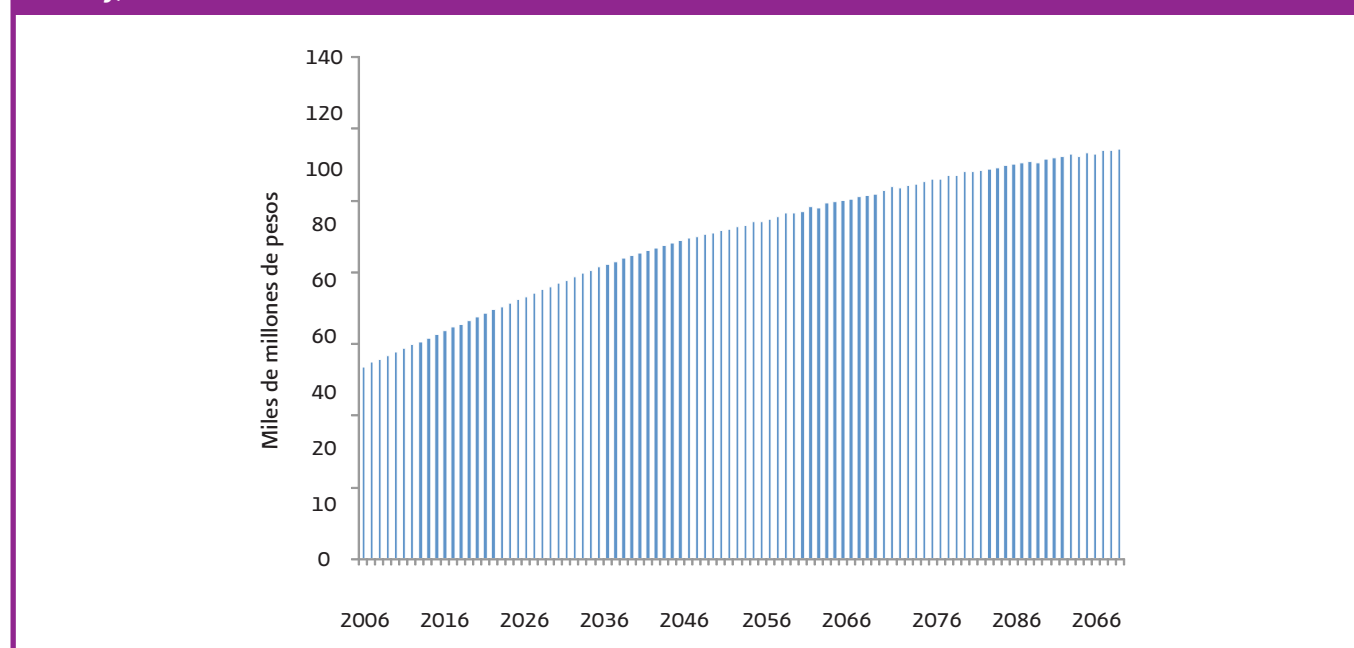
### CUADRO 33. ESTIMACIÓN DE LOS COSTOS ASOCIADOS AL CONSUMO DE AGUA PARA USO HUMANO (CONTINUACIÓN)

Estado	Costo de Producción (\$/m <sup>3</sup> )		Estado	Costo de Producción (\$/m <sup>3</sup> )	
	2050	2100		2050	2100
Durango	3.5	3.6	Sonora	5.5	6.0
Guanajuato	4.6	5.2	Tabasco	3.6	3.7
Guerrero	3.7	3.9	Tamaulipas	6.5	6.5
Hidalgo	3.6	3.6	Tlaxcala	3.5	3.5
Jalisco	4.6	4.8	Veracruz	4.3	4.6
Estado de México	5.8	6.4	Yucatán	4.0	4.4
Michoacán	3.7	3.9	Zacatecas	3.8	3.8

Asimismo, la trayectoria esperada de los costos totales de producción de agua para consumo humano, bajo el escenario base de la demanda de agua para abastecimiento público, se presenta en la Gráfica 80 en donde se observa que el costo total sigue una trayectoria ascendente.

La trayectoria de los costos es ascendente, atendiendo a la trayectoria de la demanda esperada para abastecimiento público. Sin embargo a esta cantidad se debe descontar la recaudación derivada del cobro por el consumo del recurso hídrico. Así, con base en información de la CONAGUA se estimó una recaudación de \$ 0.143 pesos por m<sup>3</sup>, lo que significaría que el subsidio es de aproximadamente el 96% del costo por metro cúbico de agua consumido. De lo anterior, se obtiene el siguiente cuadro comparativo para los años 2006 y 2100 de los costos asociados al escenario base. En este sentido, mantener la demanda de agua para consumo humano de acuerdo a la estructura de subsidio actual tendrá un costo significativo para las finanzas públicas. En efecto el subsidio, para garantizar el suministro de agua para abastecimiento público crecería a un ritmo de 1.8% en términos reales de 2008 a 2050 y en 0.45% anual de 2050 a 2100 (Cuadro34).

**Gráfica 80. Evolución del costo de producción de agua para consumo humano a nivel nacional (a precios de 2006), 2007-2100**



## CUADRO 34. COMPARATIVO DE COSTOS, RECAUDACIÓN Y SUBSIDIO 2006, 2050 Y 2100

Concepto	2006	2050	2100	Tasa de crecimiento promedio anual (%)		Incremento porcentual	
				2006-2050	2050-2100	2006 a 2050	2050 a 2100
Costo de producción (\$/m <sup>3</sup> ) (promedio)	3.69	4.61	4.8	0.5	0.08	25%	4.12%
Costo total nacional ( millones de pesos a precios de 2006)	42,129	91,136	114,468	1.8	0.5	116%	25.60%
Recaudación (millones de pesos precios de 2006)	1,535	2,517	3,022	1.2	0.4	64%	20.06%
Subsidio (millones de pesos a precios de 2006)	40,594	88,619	111,446	1.8	0.45	118%	25.75%

### COSTOS DEL AGUA PARA CONSUMO AGROPECUARIO

Un procedimiento similar se siguió en el caso de los costos del agua para consumo agrícola. De este modo, se obtuvo información por entidad federativa del costo del consumo de agua para los productores agrícolas. La información corresponde a la categoría de Precios al Productor y Costos para la agricultura disponible en el SIAP de la SAGARPA<sup>27</sup>. Así, los costos estimados de agua para consumo agrícola para el año 2005 (año para el que existía información para todos los Estados disponibles) se reportan en el Cuadro 35. Sin embargo, existe una enorme dispersión en la información por Estado donde el promedio se ubica en \$ 0.214 pesos por metro cúbico. Esta dispersión puede afectar los resultados de la estimación. La especificación de los costos es similar para el caso del consumo para abastecimiento público. Es decir, los costos son una función del consumo de agua en cada una de las 32 entidades de la República para el año 2005:

$$(17) \quad C_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + u_i$$

Donde  $C_i$  representa el costo de producción por m<sup>3</sup> de agua para consumo agrícola,  $\beta_0$  representa una constante en los costos de producción de agua para consumo agrícola que no depende de la entidad federativa ni del nivel de consumo,  $\beta_1$  captura las variaciones en el costo de producción de agua de acuerdo a los niveles de consumo ( $X_i$ ) y finalmente  $u_i$  captura el efecto de otros factores estocásticos que influyen en el costo de producción.

### CUADRO 35. COSTOS DE PRODUCCIÓN PARA EL SECTOR AGROPECUARIO

Estado	Costo de Producción (\$/m <sup>3</sup> )	Estado	Costo de Producción (\$/m <sup>3</sup> )
Aguascalientes	0.255	Morelos	0.071
Baja California	0.872	Nayarit	0.046
Baja California Sur	0.230	Oaxaca	0.150
Campeche	0.221	Nuevo León	0.169
Chiapas	0.026	Puebla	0.189
Chihuahua	0.333	Querétaro	0.272

<sup>27</sup> Estos costos consideran todos aquellos gastos derivados del suministro de agua para la actividad agrícola para los distintos cultivos reportados. Así, del promedio del costo para los cultivos reportados por Estado se obtuvo el costo para el suministro de agua por hectárea por entidad federativa. Por otro lado, a partir de la información disponible en la CONAGUA por distritos de riego se obtuvieron unos requerimientos medios de agua por hectárea. Finalmente, se dividieron los costos de agua por hectárea (\$/hec) entre los requerimientos de agua calculados por hectárea (m<sup>3</sup>/hec), con lo que se obtuvieron los costos unitarios del agua para la agricultura (\$/m<sup>3</sup>).

### CUADRO 35. COSTOS DE PRODUCCIÓN PARA EL SECTOR AGROPECUARIO (CONTINUACIÓN)

Estado	Costo de Producción (\$/m <sup>3</sup> )	Estado	Costo de Producción (\$/m <sup>3</sup> )
Coahuila	0.277	Quintana Roo	0.221
Colima	0.144	San Luis Potosí	0.262
Distrito Federal	0.136	Sinaloa	0.109
Durango	0.197	Sonora	0.299
Guanajuato	0.250	Tabasco	0.221
Guerrero	0.115	Tamaulipas	0.087
Hidalgo	0.191	Tlaxcala	0.151
Jalisco	0.205	Veracruz	0.032
Estado de México	0.200	Yucatán	0.221
Michoacán	0.218	Zacatecas	0.485

Los resultados de la estimación indican que existe una asociación positiva entre el consumo de agua y los costos.

$$(18) \quad C_i = 0.2035 + 5.8240 e^{-12} * X_i$$

Considerando la trayectoria del consumo de agua para el sector agrícola al 2050 y al 2100 es factible aproximar entonces una trayectoria de estos costos (Gráfica 81). De esta manera, los costos unitarios de producción de agua pronosticados para 2050 y 2100 (a precios de 2005) se reportan en el Cuadro 36. Es importante señalar, que la estimación de costos no considera cambios en la actual estructura de tarifas y que tampoco existe innovación tecnológica que permita disminuir el consumo o hacer un uso más eficiente del recurso hídrico. Por ello los resultados deben de tomarse como el costo máximo esperado, bajo el escenario de mayor crecimiento de la demanda de agua para uso agrícola.

### CUADRO 36. COSTOS ESTIMADOS DEL CONSUMO DE AGUA PARA USO AGROPECUARIO, 2050-2100

Estado	Costo de Producción (\$/m <sup>3</sup> )		Estado	Costo de Producción (\$/m <sup>3</sup> )	
	2050	2100		2050	2100
Aguascalientes	0.258	0.259	Morelos	0.210	0.212
Baja California	0.899	0.903	Nayarit	0.213	0.219
Baja California Sur	0.234	0.235	Oaxaca	0.220	0.249
Campeche	0.225	0.230	Nuevo León	0.211	0.217
Chiapas	0.225	0.241	Puebla	0.219	0.223
Chihuahua	0.361	0.374	Querétaro	0.276	0.279
Coahuila	0.285	0.294	Quintana Roo	0.223	0.223
Colima	0.216	0.222	San Luis Potosí	0.267	0.270
Distrito Federal	0.204	0.204	Sinaloa	0.295	0.318
Durango	0.216	0.220	Sonora	0.341	0.382
Guanajuato	0.270	0.286	Tabasco	0.224	0.225
Guerrero	0.210	0.210	Tamaulipas	0.256	0.292
Hidalgo	0.220	0.223	Tlaxcala	0.205	0.206

### CUADRO 36. COSTOS ESTIMADOS DEL CONSUMO DE AGUA PARA USO AGROPECUARIO, 2050-2100 (CONTINUACIÓN)

Estado	Costo de Producción (\$/m <sup>3</sup> )		Estado	Costo de Producción (\$/m <sup>3</sup> )	
	2050	2100		2050	2100
Jalisco	0.232	0.236	Veracruz	0.234	0.240
Estado de México	0.212	0.213	Yucatán	0.227	0.230
Michoacán	0.241	0.259	Zacatecas	0.497	0.497

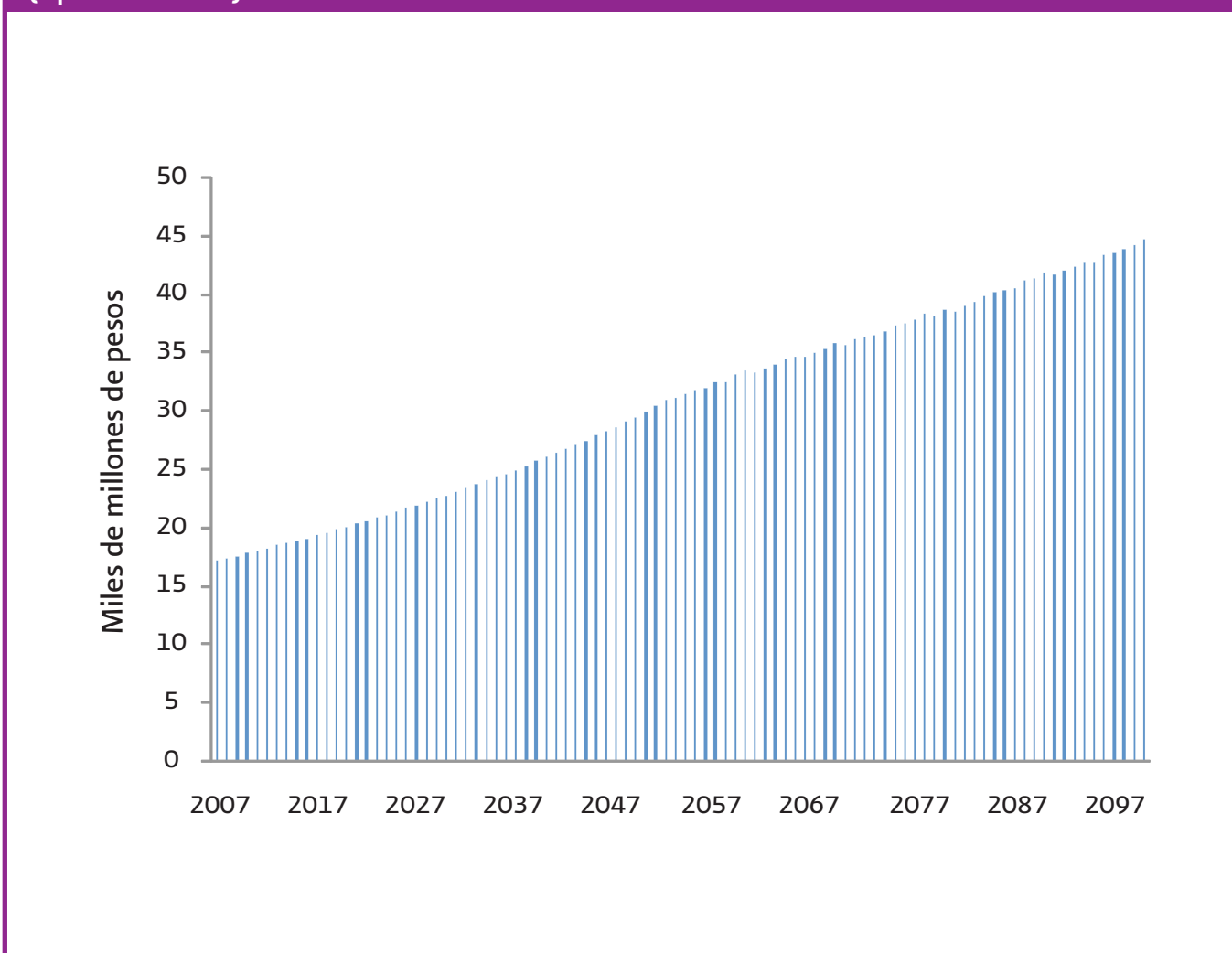
Finalmente, con base en datos publicados por CONAGUA se estimó una recaudación de \$ 0.0025 pesos por m<sup>3</sup>, lo que significa un 98.8% de subsidio, en promedio, por m<sup>3</sup> de agua consumido. De lo anterior, se obtiene el cuadro 37 comparativo para los años 2006 – 2100 donde se observa el aumento del costo del subsidio del agua para el 2100.

### CUADRO 37. COMPARATIVO DE COSTOS, RECAUDACIÓN Y SUBSIDIO 2006, 2050 Y 2100.

Concepto	2006	2050	2100	Tasa de crecimiento promedio anual (%)		Incremento porcentual	
				2006-2050	2050-2100	2006 a 2050	2050 a 2100
Costo de producción (\$/m <sup>3</sup> ) (promedio)	0.214	0.270	0.280	0.5	0.07	26%	4%
Costo total nacional (millones de pesos a precios de 2006)	13,203	29,891	45,205	1.8	0.5	126%	51%
Recaudación (millones de pesos precios de 2006)	151	266	384	1.2	0.4	75%	44%
Subsidio (millones de pesos a precios de 2006)	13,052	29,625	44,821	1.8	0.45	127%	51%



**Gráfica 81. Evolución de los costos totales de producción de agua para uso agropecuario 2007-2100 (a precios de 2006)**

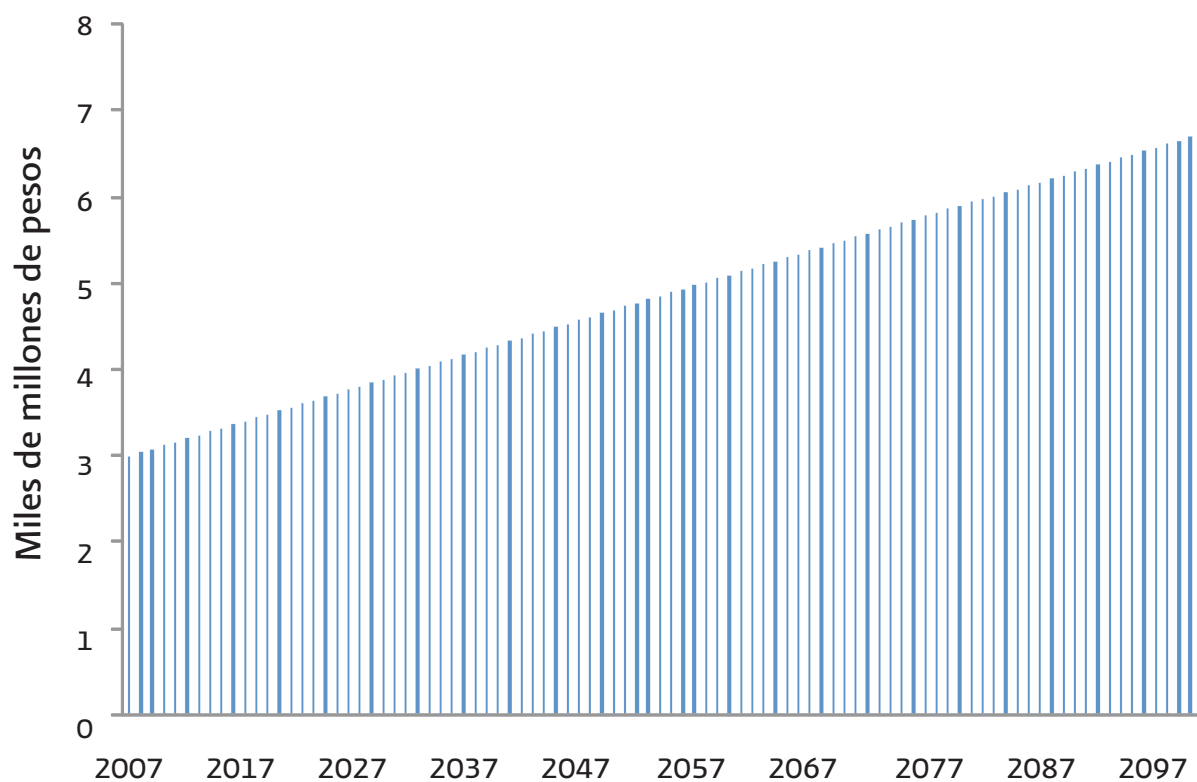


### **COSTOS DEL CONSUMO DE AGUA PARA EL SECTOR INDUSTRIAL**

Por desgracia, no se dispone de información detallada sobre los costos del agua para el sector industrial. Sin embargo, las estimaciones realizadas con base en la información de la matriz de insumo producto indican que el consumo de agua en el sector industrial representa el 2% del total de insumos (Bravo, 2008 y Ruiz, 2008). Con base en esta información y con la proyección del PIB industrial se obtuvo una estimación del consumo intermedio de este sector y, bajo el supuesto, de que no se modifica la estructura de los costos, entonces se obtiene una estimación aproximada de los costos del consumo del agua del sector industrial.

Así, la trayectoria de los costos estimados se presenta en la Gráfica 82 donde se observa que los costos pasarían de un nivel de 3 mil millones de pesos a precios de 2006, a un nivel de aproximadamente 6 mil millones. Ello indica que los costos se duplicarían hacia el 2100. Estos resultados deben de tomarse con cierta precaución toda vez que los costos son solo una aproximación a partir de los insumos intermedios de la industria y desde luego que una mayor eficiencia reduciría los impactos en costos.

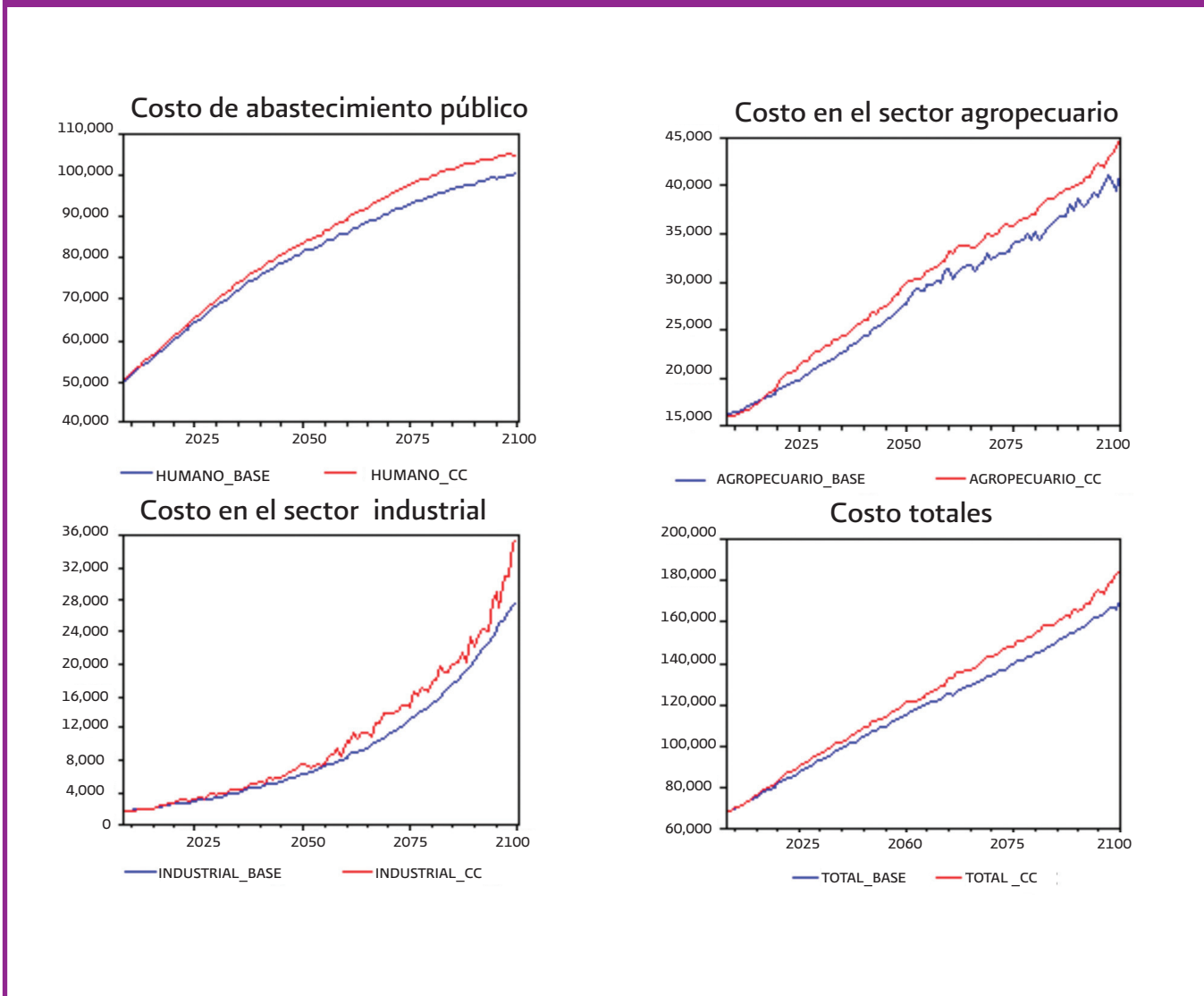
**Gráfica 82. Evolución de los costos totales de producción de agua en el sector industrial 2007-2100 (a precios de 2006)**



Así, la estimación de los costos asociados al cambio climático se puede estimar de acuerdo a la siguiente diferencia (Gráfica 83):

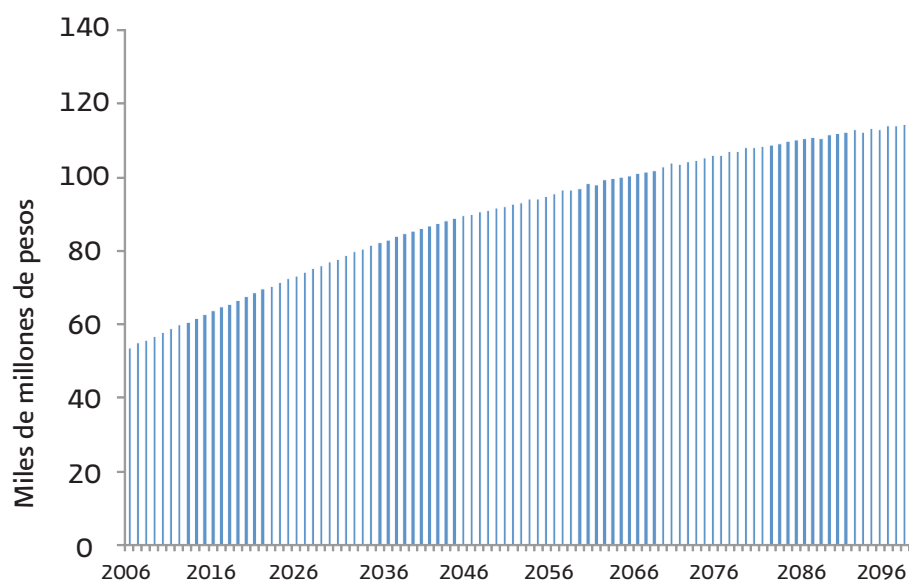
$$\text{Costos Cambio Climático} = \text{Costos}_{\text{demanda de agua bajo cambio climático}} - \text{Costos}_{\text{demanda de agua base}}$$

**Gráfica 83. Evolución de los costos asociados al cambio climático: escenario A2**

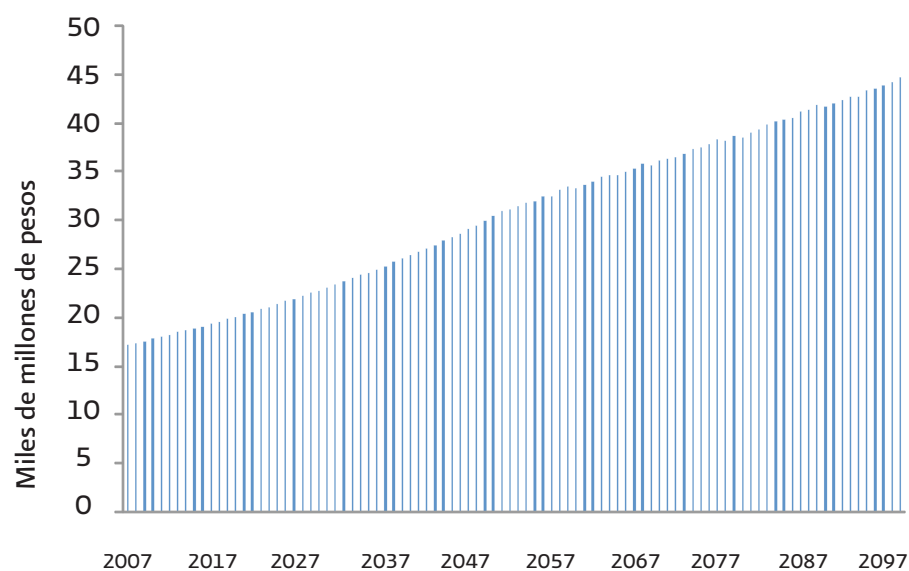


En efecto, la trayectoria base de la demanda de agua permite obtener una medida del costo asociado a dicha trayectoria, al considerar que el cambio en la temperatura permite obtener una trayectoria diferente para la demanda de agua, a la que se asocia una trayectoria de costos. La evolución de estos costos por sectores se sintetiza en las Gráficas 84, 85 y 86.

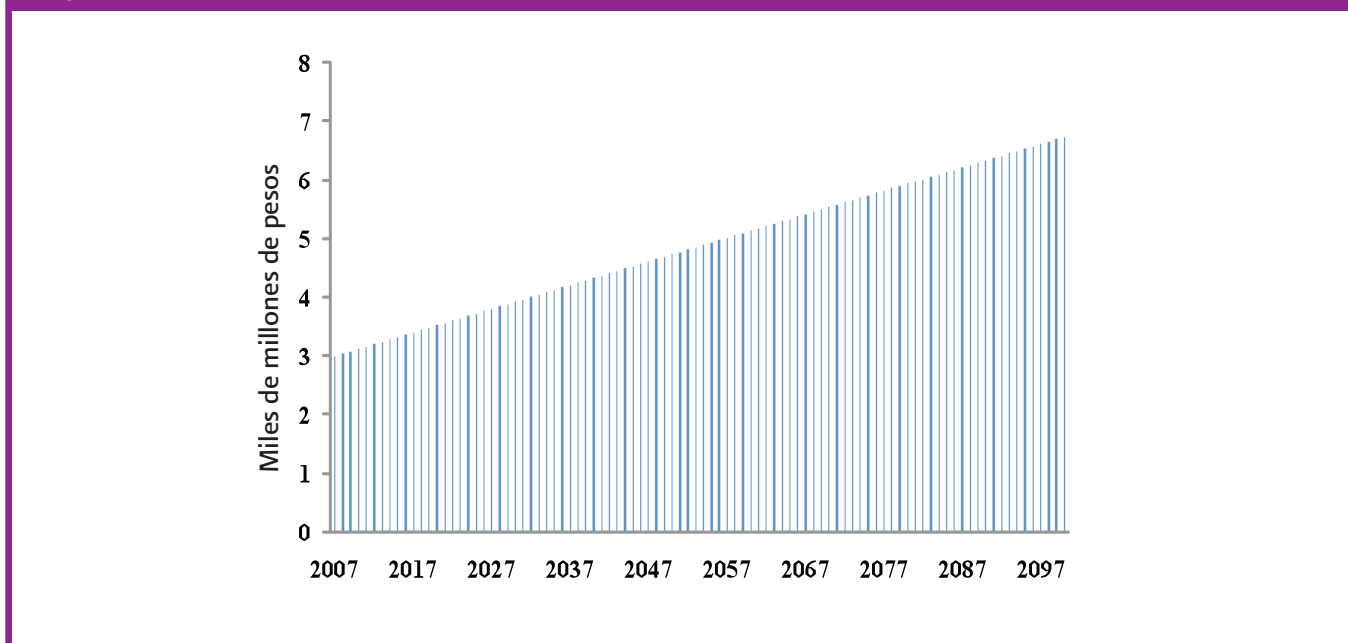
**Gráfica 84. Evolución de los costo de producción de agua para el consumo humano a nivel nacional 2007-2100 (a precios de 2006)**



**Gráfica 85. Evolución de los costos totales de producción de agua para uso agropecuario 2007-2100 (a precios de 2006)**



**Gráfica 86. Evolución de los costos totales de producción de agua en el sector industrial 2007-2100 (a precios de 2006)**



A fin de obtener una medida comparativa se realizó un cálculo a Valor Presente Neto (VPN) de los costos anuales con tasas de descuento de 0.5%, 2% y del 4% y se les expresa como porcentaje del PIB de 2006. Esta medida permite indicar lo que costaría el impacto del cambio climático sobre la demanda de agua en el periodo de 2008 a 2100 con respecto al valor actual de la producción. Así, el VPN con una tasa de descuento del 4%, representa el 4.50% del PIB para el 2100 (Cuadro 38). Este valor representa el costo asociado al cambio climático para garantizar el abastecimiento del recurso hídrico.

### **CUADRO 38. COSTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO POR PÉRDIDAS DEL SECTOR HÍDRICO (COMO PORCENTAJE DEL PIB)**

Año	Tasa de descuento		
	0.5%	2%	4%
2050	7.59%	4.02%	2.20%
2100	18.85%	9.41%	4.50%

## **8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

1. México es altamente vulnerable a condiciones extremas de tiempo y clima en su sector hídrico.
2. La distribución de la precipitación es heterogénea, tanto en temporalidad como a nivel espacial. Esto se debe principalmente a las condiciones orográficas y las características propias de las latitudes en las que se ubica el país que ocasionan una distribución irregular de la lluvia. Las diferencias en niveles de precipitación, aunado a la distribución espacial de las actividades económicas han generado fuertes diferencias en la disponibilidad per cápita de agua por regiones.

3. El sector agrícola es el principal consumidor del recurso hídrico. Las carencias y deficiencias en la tecnología e infraestructura de riego hacen que la eficiencia sea tan solo de 46%. La distribución espacial del consumo del recurso hídrico para uso agrícola muestra una gran concentración en muy pocos Estados de la República Mexicana. Por ejemplo, el Estado de Sinaloa, principal productor agrícola, demanda aproximadamente el 14.2% del volumen total para el sector agrícola.
4. La demanda para abastecimiento público o consumo humano muestra también una trayectoria ascendente a los largo de los últimos veinte años, con un ritmo de crecimiento de 2.3% promedio anual. Sin embargo, existen rezagos en la cobertura nacional de agua potable. Prácticamente el 51.8% del volumen destinada al consumo humano se ubica espacialmente en siete Estados de la República Mexicana, que corresponden a las entidades con mayor población urbana.
5. El consumo del recurso hídrico por parte de la industria se ha mantenido relativamente estable, sobre todo en los últimos diez años con un crecimiento promedio anual de sólo 0.8% con un volumen en alrededor de los 3 mil millones de metros cúbicos al año. A nivel regional, el Estado de Veracruz es el principal consumidor del recurso hídrico para la industria autoabastecida, le sigue en importancia Quintana Roo probablemente asociado a la expansión turística.
6. Las estimaciones realizadas para la demanda de agua por sus distintos usos (agropecuario, abastecimiento público e industrial) y por Estado, muestran que puede modelarse como la demanda de cualquier otro bien. Es decir, la demanda de agua es una función del ingreso, de los precios relativos y de la dinámica de la población. En el caso del abastecimiento público, la elasticidad asociada a la población es mucho más alta que la registrada por el nivel de ingreso en tanto que los precios relativos tienen un signo negativo pero una magnitud muy baja. Así, el consumo humano responde en mayor medida al ritmo de crecimiento de la población en relación al crecimiento económico.
7. Los resultados obtenidos para el sector agropecuario reportan una elasticidad ingreso mayor a la unidad. Ello refleja, desde luego, que el agua es un insumo importante para la producción de este sector pero que se va reduciendo paulatinamente su consumo promedio. La respuesta de la demanda más que proporcional a los cambios en la trayectoria del producto agrícola sugiere que el agua está siendo utilizada en forma creciente. La elasticidad precio en todas las entidades es negativa y se ubica en un rango de -0.2 a -0.4; la más alta en relación al sector industrial y consumo humano. Este resultado es compatible con otras investigaciones realizadas tanto para México como otros países. Sin embargo, en el caso de México, la estructura de mercado en cada uno de los sectores es distinta, ya que los usuarios agrícolas reciben el agua gratuitamente, pagando solo por el uso y mantenimiento de la infraestructura hidro-agrícola y el precio no refleja el costo del agua lo que matiza los resultados.
8. El consumo industrial también muestra una elasticidad ingreso mayor a la unidad pero una elasticidad precio relativo bastante baja. Ello asociado a que los industriales adquieren el agua en un mercado más competitivo en donde el precio por metro cúbico de agua extraída está en función directa a la escasez relativa, es decir, a mayor escasez mayor precio. Sin embargo, esta estructura de precios podría hacer pensar que incentiva que las empresas más consumidoras de agua se localicen donde el agua es más abundante, sin embargo, la evidencia empírica muestra que esto no sucede ya que la localización de las empresas se debe a otras razones económicas. Ello sugiere que la señal de precio o costo del agua es aún insuficiente para modificar patrones de conducta de localización.
9. Las magnitudes de las elasticidades precio indican que existen fuertes restricciones al uso de los precios o tarifas como instrumento económico para regular el consumo de agua en México. Ello debido a que, en el corto plazo, un incremento en precios puede ser compensado por la elasticidad ingreso, incluso en un escenario de

moderado crecimiento. En este contexto, es necesario instrumentar una política más activa para modificar la relación que guarda el consumo y la extracción de agua con respecto a la actividad económica y elevar el impacto de los precios. Ello implica aplicar políticas de oferta al mismo tiempo que utilizar las regulaciones y exenciones sobre el consumo y explotación de los acuíferos.

10. En las condiciones actuales, sin considerar un cambio en el sistema de tarifas y de recaudación por parte de la CONAGUA, los factores de mayor impacto en la demanda del recurso hídrico en el mediano y largo plazo serán el crecimiento de la población, producción agropecuaria y de la producción industrial y los precios mantendrán un impacto marginal.
11. La construcción de escenarios de la demanda de agua por sus distintos usos al 2050, indican que para el caso del consumo para uso humano se puede esperar que el ritmo de crecimiento fluctúe en un rango de 0.8% a 1.4% anual, con una probabilidad de 60%. Este resultado implicaría que a nivel agregado el consumo se podría ubicar en un rango de 15,189 a 19,379 millones de litros en 2050, asumiendo el mismo nivel de probabilidad.
12. En principio las cinco entidades (Chihuahua, Sinaloa, Nuevo León, Veracruz y Guanajuato) que actualmente se ubican en la categoría "Alta demanda" para el 2050 pasarían a la categoría de "Muy alta"; además que se agregaría el Estado de Yucatán dado el incremento esperado en el tamaño de la población y su dinámica en el sector servicios. De esta manera, en la categoría de "Muy alta" demanda para el 2050 se contaría con 11 entidades y en la categoría de "Alta demanda", hacia el 2050, se ubicarían las entidades de Baja California, Querétaro y Tamaulipas. De esta manera, prácticamente la mitad de las entidades del país incrementarían de manera considerable la demanda de agua para abastecimiento público hacia el 2050.
13. Los resultados para el caso del consumo de agua para el sector agrícola muestran un crecimiento promedio anual de 1.1% a 1.3% anual con una probabilidad de ocurrencia del 60%. Así, el volumen de agua utilizado para la agricultura en 2050 se podría ubicar en un rango de 97,810 a 106,420 millones de litros. Los resultados de las simulaciones, muestran que los Estados clasificados en la categoría de "Alta demanda" en 2007 pasarían a la categoría de "Muy alta demanda" en 2050. Ello implicaría que se tendrían hasta 8 entidades en la categoría de mayor consumo de agua para uso agropecuario, que se concentraría en tres regiones del país: noroeste, pacífico y el golfo. Además entidades como Baja California, Coahuila, Nuevo León, Puebla e Hidalgo también verían un incremento en el volumen de agua para satisfacer las actividades agropecuarias.
14. Las proyecciones de la demanda de agua para uso industrial, de 2008 a 2050, muestra una trayectoria ascendente y se espera que su ritmo de crecimiento se mantenga en un rango de 0.7% a 1.5%, considerando un margen de probabilidad del 60%. Así, para 2050, se podría ubicar en un nivel de 4,208 millones de litros a 5,328 millones de litros. Asimismo, se observan cambios importantes en la distribución espacial del agua para uso industrial. Veracruz se sigue manteniendo como el principal consumidor, pero en el caso de Quintana Roo se ubicaría en 2050 en la categoría de la demanda "Muy alta", debido a la expectativa de un mayor crecimiento del sector de restaurantes y hoteles. Por otra parte, entidades como Jalisco, Michoacán, Estado de México, Puebla y Tamaulipas pasarían a la categoría de una demanda "Alta", así que prácticamente la demanda de agua para uso industrial tiende a concentrarse en el centro del país con la excepción de Quintana Roo.
15. Los impactos del cambio climático, bajo los escenarios de emisión B1, A1B y el A2, que consideran un aumento en la temperatura y una ligera disminución de la precipitación media anual indican que se puede esperar una disminución de la disponibilidad natural de agua del orden de 2% hasta 5.2% entre 2007 y 2050. El valor extremo se reporta en el escenario A2 con un mayor incremento en la temperatura y una mayor disminución en la precipitación para cada uno de los Estados del país.

16. Se espera además que el consumo agregado de los diferentes usos se incremente ante un aumento de la temperatura. Los resultados de las estimaciones econométricas muestran que a nivel agregado la demanda de agua responde más que proporcionalmente a un aumento de la temperatura media, siendo más sensibles los Estados de la frontera norte. Por lo tanto, con el cambio climático es factible esperar un aumento de la demanda por arriba de su trayectoria de largo plazo y una disminución de la disponibilidad natural.
17. Las estimaciones sobre la vulnerabilidad hídrica aumentan en la mayoría de las entidades del país. Los Estados del sureste, con excepción de Yucatán, se espera que, en 2050, se ubiquen con una vulnerabilidad muy baja en contraste el noroeste del país (Baja California, Sonora y Sinaloa) que reportará una categoría de vulnerabilidad muy alta y donde se proyecta que el cambio climático podría incrementar su vulnerabilidad entre 3.8% y 4.9%.
18. Los Estados ubicados en el centro del territorio también se verán seriamente afectados, con muy alta vulnerabilidad en el Distrito Federal, el Estado de México y Morelos con un impacto en el índice de entre 4.6% y 5.8%. Nuevo León y Tamaulipas, también con muy alta vulnerabilidad, podría esperarse un aumento entre 2.3% y 3.5%. El resto de las entidades con muy alta vulnerabilidad (Colima, Guanajuato y Aguascalientes) puede incrementarse entre 4.2% y 5.3%.
19. Las entidades con alta vulnerabilidad, Michoacán, Querétaro, Hidalgo y Tlaxcala, se espera un aumento en la vulnerabilidad de 4.5% a 5.6% respecto a 2007. Por su parte, Chihuahua y Coahuila aumentan su vulnerabilidad en un rango promedio de 4.6% a 5.8%. Los resultados, muestran que los Estados de la frontera norte, incrementarán su vulnerabilidad en términos del consumo y disponibilidad del recurso hídrico, ante las condiciones de cambio climático en niveles de 3.6% a 4.7%. Por su parte, los Estados del centro del país pueden registrar una mayor vulnerabilidad, dado la expansión de los centros urbanos y la producción agrícola, que podría ubicarse entre 4.6% a 5.8% y que son actualmente las regiones con mayor nivel de vulnerabilidad.
20. Estos resultados muestran que el país enfrentará una fuerte expansión de la demanda del recurso hídrico por sus distintos usos, siendo más afectados los Estados de la frontera norte, occidente y centro del país. En este contexto, el cambio climático es un factor que incrementa la vulnerabilidad de las distintas entidades en un rango de 2% hasta 7% en promedio.
21. En caso de no modificarse las condiciones actuales sobre las tarifas de precios y tecnología entonces el costo de garantizar el abastecimiento del recurso hídrico en los tres sectores consumidores llegaría a un nivel de 4.50% del PIB para el 2100, considerando una tasa de descuento del 4%. Ello desde luego no considera la opción de una reducción de costos por avances tecnológicos.
22. Disponer de mejor información y capacidad de pronóstico a escalas regional y local, así como con diagnósticos sobre el grado de vulnerabilidad en los distintos sectores resulta relevante para integrar una política de prevención y mitigación, orientada a reducir los potenciales costos derivados de los fenómenos climáticos.

## RECOMENDACIONES

- a. Las proyecciones realizadas sugieren que es indispensable mejorar la administración del agua. Ello implica reducir las pérdidas por ineficiencia en el manejo del recurso en particular del sector agrícola y en el consumo residencial.
- b. El mejor manejo del recurso incluye mejores regulaciones y simultáneamente una señal adecuada de precios. Esto es, requiere ponderar las opciones de un aumento de precios sin que ello impacte negativamente a sectores de la población más desprotegidos.



## CAPÍTULO 3.3. CAMBIO DE USO/COBERTURA DE SUELO

### Puntos fundamentales

El análisis de la dinámica en las coberturas vegetales así como del uso del suelo permite conocer las principales tendencias de procesos de amplia relevancia como la deforestación, y degradación vegetal, así como la desertificación y la pérdida de biodiversidad. Esta información también resulta fundamental para estimar la dinámica de procesos asociados tales como la captura de carbono, el ciclo de nutrientes como el fósforo y el nitrógeno, la erosión, la degradación y el cambio en productividad de suelo, la fragmentación, así como la regulación hidrológica y la dinámica de poblaciones de fauna silvestre.

Las actividades humanas constituyen la principal fuente de deterioro y transformación de los ecosistemas naturales. Las estimaciones de cambio de uso del suelo en México son consistentes en señalar que existe una pérdida importante de selva y bosque en las últimas décadas y que la pérdida de selvas es proporcionalmente mayor que la de bosques. En 1992 el "Forest Global Assessment" clasificó a México como el país con la tasa anual de deforestación más alta a nivel mundial (1.3%) y cuarto de acuerdo a su superficie deforestada (FAO, 1993). Los agentes causales de la deforestación de mayor impacto son los productores agrícolas y ganaderos y se reconoce que los productores forestales ejercen un menor impacto en este proceso. Las decisiones de los agentes causales de la deforestación incluyen preferencias, recursos disponibles, precios relativos (mercado de bienes y servicios), tecnología, accesibilidad, estructura de gobierno (Instituciones), cultura e información. La evidencia empírica sugiere entonces que existe una relación importante entre los distintos cambios de uso de suelo y las fuerzas económicas.

La matriz de transición es una herramienta útil para representar el cambio entre diversas formaciones en periodos consecutivos. Esta matriz se construyó para México, con base en los inventarios de 1976 y 2000, y muestra que la transformación de la vegetación primaria de bosques y selvas a pastizales es la principal causa de deforestación, seguida de la transformación de cobertura arbórea a cultivo.

Las proyecciones de cambio de uso del suelo con posibles variaciones en clima, asociados a distintos escenarios de cambio climático, se modelaron con las probabilidades de transición como función de variables climáticas y algunas otras variables de control, como el PIB, que es una variable que refleja la tendencia inversa ligada al cambio de uso agrícola, es decir, a un PIB más elevado, mayor es la probabilidad de que no se cambie el uso del suelo, lo que se relaciona a la existencia de otras alternativas económicas en la región diferentes a la producción primaria.

Los resultados de los pronósticos de cambio de uso del suelo muestran que la mayor parte de la superficie forestal se concentra en zonas de cambio moderado en temperatura e incluso aumentos en la precipitación pluvial, lo que parecería mejorar las condiciones de crecimiento para las masas forestales y empeorar las condiciones de falta de humedad en las zonas áridas y semiáridas. No fue posible evaluar el efecto de aumento en la concentración de algunos gases de efecto invernadero debido a que los modelos de cambio en las formaciones no incorporan este efecto. No obstante, cabría esperar un mayor rendimiento en las masas forestales y pastizales como consecuencia de una mayor concentración de CO<sub>2</sub>, tal y como ha sido reportado por varios autores (Norby *et al.*, 1999, Bolker *et al.*, 2006).

La evaluación del cambio de uso del suelo ante un escenario de cambio climático se puede realizar considerando todas las opciones de la superficie ganada o perdida para un uso en específico. Se consideraron tres usos de las coberturas vegetales: uso maderable, captura de carbono y pérdida de inventario de carbono por cambio de uso. Los resultados muestran que en las primeras etapas de transición existe un costo alto promovido por las extensiones de matorrales que se van perdiendo y que tienen un peso fuerte en el inventario de CO<sub>2</sub> que se pierde. Hacia finales de la década de 2030's se observa una recuperación del valor derivado del cambio climático, favorecido al dejarse de perder grandes extensiones de matorrales, de bosques, selva y manglares.

El escenario de cambio climático podría tener, en principio, beneficios netos a nivel país, dado que podría reducir los incentivos de cambio de uso del suelo en bosques, selvas y manglares con los consecuentes beneficios ambientales. Ello significa que es probable que se amortigüen relativamente las tendencias negativas al cambio de uso de suelo. Ello, sin embargo, no contempla los efectos ocasionados por el aumento de eventos extremos, incendios y cambio de tipo de bosque. Por el lado de los costos es muy probable que se pierdan grandes extensiones de matorrales, pastizales naturales y vegetación halófila que sin duda tienen un enorme valor de biodiversidad, pero comparadas con productos maderables y de servicios como la captura de carbono tienen menor impacto al compararse con los beneficios de reducir la tasa de deforestación. De esta forma para el 2091 se obtienen beneficios del cambio climático bajo el escenario A2 de 0.09% del PIB.

Los aumentos pronosticados en niveles de CO<sub>2</sub> y deforestación generan climas más secos y cálidos lo que incide en un aumento en la quema de bosques. Con el cambio climático se incrementarán dichos eventos lo que repercutirá directamente en los bosques mexicanos. Incorporando el índice de Peligro de Incendios Forestales y los posibles impactos en dicho índice por los escenarios de cambio climático los beneficios obtenidos disminuyen de manera considerable. De esta forma, para el 2091, con el escenario A2, se tienen beneficios de sólo 0.008% del PIB, descontados al 4%. Ello excluye los costos de degradación del suelo.

## 1. INTRODUCCIÓN

El uso del suelo es uno de los temas de mayor relevancia en las discusiones de política ambiental a escala mundial y es tema central en la estimación de impactos en los escenarios de cambio climático. El estudio de la dinámica en las coberturas vegetales así como el uso del suelo permite conocer las tendencias de procesos de amplia relevancia como la deforestación, y la degradación vegetal (Veldkamp, Lambin, 2001), así como la desertificación y la pérdida de biodiversidad (Lambin *et al.*, 2001, Wessels *et al.*, 2000, Velázquez *et al.*, 2002). Esta información también resulta básica para estimar la dinámica de procesos asociados, como la captura de carbono (Houghton, 1999; Cairns *et al.*, 2000), los ciclos de nutrientes como el fósforo y el nitrógeno (Johnes, 1996), la erosión, la degradación y el cambio en productividad de suelos (Dechert *et al.*, 2004), la fragmentación (Laurance y Williamson, 2001), así como la regulación hidrológica y la dinámica de poblaciones de fauna silvestre (Cuarón, 2000; Sánchez *et al.*, 2005; Moinde-Fockler *et al.*, 2007).

No obstante, que existen siniestros naturales que pueden cambiar abruptamente la cobertura vegetal es, normalmente aceptado que las actividades humanas constituyen la principal fuente de deterioro y transformación de los ecosistemas naturales (Vitousek *et al.*, 1997). Así, se estima que la pérdida de coberturas arboladas desde el inicio de la humanidad hasta el presente va de un tercio a casi la mitad (Noble y Dirzo 1997; Cincotta *et al.*, 2000) de la superficie original con cobertura arbolada. El proceso de deforestación se ha agudizado en los últimos siglos en la medida que el hombre ha tenido mayor capacidad de penetración y transformación de las áreas naturales (Chomitz y Gray, 1996) tanto para uso de las mismas, como para cambiar su vocación. Evidentemente, la acelerada pérdida de la cubierta forestal trae como consecuencia la degradación de la reserva genética, la pérdida del potencial de uso de los múltiples bienes y servicios ambientales que proporcionan los ecosistemas para el bienestar humano, el calentamiento global, la alteración de ciclos hidrológicos y biogeoquímicos, la introducción de especies exóticas, el exterminio de las especies nativas y la pérdida de hábitat en general (Cairns *et al.*, 2000, Velázquez *et al.*, 2002).

Las cifras de deforestación resultan alarmantes a nivel mundial, aunque el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) advierte que en el caso de países tropicales las estimaciones son muy inciertas. FAO (2001) reporta que en la década de los noventa desaparecieron alrededor de 9.4 millones de hectáreas, cifra que contrasta con el estimado de Achard *et al.*, (2002) de  $5.8 \pm 1.4$  millones de hectáreas para el periodo 1990-1997. Estos últimos autores estiman una superficie adicional de  $2.3 \pm 0.7$  millones de hectáreas de bosques visiblemente degradados. Las estimaciones de cambio de uso del suelo en México señalan que los bosques tropicales constituyen solo un 10% de su cobertura original (Rzedowski, 1978) y que toda la cubierta forestal es tan solo la mitad de la cobertura que existía hace 30 años. Todas las estimaciones son consistentes en señalar que existe una pérdida importante de selva y bosque en las últimas décadas y que la pérdida de selvas es proporcionalmente mayor que la de bosques; de igual forma todas las estimaciones coinciden en mostrar que los cultivos y los pastizales inducidos y cultivados que representaban más de 41 millones de hectáreas (21% del territorio nacional) hacia el año 2000, siguen incrementando su superficie a tasas de conversión superiores a las que se observan en el resto de los países intertropicales (Velázquez, 2002). Así, por ejemplo, para el año 2000 se consideraba que existían en el país cerca de 32.8 millones de hectáreas destinadas al uso agropecuario, pero donde solo se cultivaban 20.2 millones de hectáreas. Este hecho sugiere que la expansión agrícola se ha realizado en buena medida a través de la reducción de suelos con vegetación muchos de los cuales tienen una productividad agrícola marginal. Sin embargo, cabe destacar que dicha expansión agrícola o la de cualquier otro uso de suelo no puede crecer indefinidamente ya que la extensión del territorio nacional constituye una restricción natural.

En 1992 el “Forest Global Assessment” clasificó a México como el país con la tasa anual de deforestación más alta a nivel mundial (1.3%) y cuarto de acuerdo a su superficie deforestada (FAO, 1993). Las cifras oficiales señalan que la superficie boscosa se ha reducido a una tasa de 0.79% en los últimos diez años mientras que la superficie de selva lo ha hecho a una tasa anual de 1.58%. Ambas cifras representan una pérdida de alrededor de 784,968 hectáreas arboladas<sup>28</sup> con importantes efectos negativos en términos de pérdida de biodiversidad y de servicios ambientales. El objetivo de este apartado es entonces estimar la dinámica de cambio de uso del suelo con base en la información existente y proyectar sus respuestas ante diversos escenarios asociados al cambio climático.

## 2. DEFINICIÓN DE UNA LÍNEA BASE DE CAMBIO DE USO DEL SUELO

El cambio de uso del suelo tiene una gran cantidad de factores promotores que se han clasificado como causales inmediatos y causales indirectos. Los primeros tienen que ver con las fuerzas que determinan la transformación inmediata de la cobertura y uso del suelo, mientras que los segundos identifican las fuerzas detrás del proceso que promueven acciones que afectan el cambio del paisaje. Asimismo, las primeras tienen que ver con variables locales y de impacto en corto plazo como extracción maderable, expansión de la frontera agrícola o pecuaria, colonización de áreas, desarrollo de infraestructura y urbanización. Detrás de estas variables se encuentran los causales indirectos, que son las fuerzas fundamentales de orden sociopolítico, económico, cultural y biofísico que promueven el cambio de uso del suelo, incluyendo variables macro como crecimiento poblacional, políticas de desarrollo rural, comercio y desarrollo institucional.

En México existen varios esfuerzos por realizar tanto la cartografía del uso del suelo (Miranda y Hernández, s.f., INEGI 1971 y 1993, Rzedowski, 1978, SARH, 1992 y 1994, Dirzo y Masera, 1996) como para evaluar la dinámica espacio-temporal de la cubierta vegetal (Velázquez *et al.*, 2002); análisis también conocidos como de cambio de uso/cobertura del suelo (LUCC por las siglas en inglés de «land use/cover change, Berry *et al.*, 1996). No obstante, tales esfuerzos se han realizado con objetivos, criterios (evaluación y clasificación de coberturas) y escalas diversas (desde 1:50000 hasta 1:8 millones). Esto ha dado por resultado que los análisis de cambio de cobertura y uso del suelo, incluyendo el forestal, no sean homogéneos, y por lo tanto los resultados sean relativamente incomparables en términos de las categorías de mapeo que se utilizan, así como de las escalas de trabajo (Velázquez *et al.*, 2006). Las estimaciones de cambio de uso del suelo en México señalan que los bosques tropicales constituyen solo un 10% de su cobertura original (Rzedowski, 1978) y que toda la cubierta forestal es tan solo la mitad de la cobertura que existía hace 40 años. Todas las estimaciones son consistentes en señalar que existe una pérdida importante de selva y bosque en las últimas décadas y que la pérdida de selvas es proporcionalmente mayor que la de bosques; de igual forma, todas las estimaciones coinciden en mostrar que los cultivos y los pastizales inducidos y cultivados que representaban más de 41 millones de hectáreas (21% del territorio nacional) hacia el año 2000 siguen incrementando su superficie a tasas de conversión superiores a las que se observan en el resto de los países intertropicales (Velázquez, *et al.*, 2002). Así, por ejemplo, para el año 2000 se consideraba que existían en el país cerca de 32.8 millones de hectáreas destinadas al uso agropecuario, pero donde solo se cultivaban 20.2 millones de hectáreas (Cuadro 39). Este hecho sugiere que la expansión agrícola se ha realizado en buena medida a través<sup>29</sup> de la reducción de suelos con vegetación muchos de los cuales tienen una productividad agrícola marginal. Sin embargo, cabe destacar que dicha expansión agrícola o la de cualquier otro uso de suelo no puede crecer indefinidamente ya que la extensión del territorio nacional constituye una restricción natural.

<sup>28</sup> Ver el informe mencionado en la cita anterior

<sup>29</sup> Utilizando, por ejemplo, el método de roza, tumba y quema..

## CUADRO 39. EVOLUCIÓN Y TASAS DE CAMBIO DE LOS USOS DE SUELO EN MÉXICO

Vegetación y uso del suelo	Superficie (km <sup>2</sup> )			Superficie afectada		Tasa anual de cambio	
	1976	1993	2000	1976-1993	1993-2000	1976-1993	1993-2000
Bosques	352,323	346,705	328,002	-330.5	-2,671.8	-0.09	-0.79
Selva	378,589	343,641	307,396	-2,055.7	-5,177.9	-0.57	-1.58
Matorrales	605,287	576,478	557,416	-1,694.7	-2,732.2	-0.29	-0.48
Otros tipos de vegetación	77,453	76,607	84,327	-49.8	1,102.8	-0.06	1.38
Pastizales naturales	104,907	102,191	85,083	-159.8	-2,443.9	-0.15	-2.58
Pastizales inducidos y cultivados	150,294	175,732	232,414	1,496.4	8,097.3	0.92	4.07
Cultivos	263,446	302,087	327,587	2,273.0	3,642.9	0.81	1.16
Asentamientos humanos	2,334	11,204	12,419	521.1	173.7	9.64	148.00

Fuente: Informe de la Situación del Medio Ambiente en México, SEMARNAT (2003)

### Descripción de categorías usadas para estandarizar nomenclaturas de las coberturas de tipo de vegetación

Categoría de tipo de vegetación	Abreviación	Descripción de la categoría
Bosque	B	Todos los bosques de clima templado, incluyendo matorral de coníferas
Matorral	M	Todos los tipos de matorral, chaparral y mezquital incluyendo vegetación de desiertos arenosos
Otras coberturas	oc	Zonas urbanas, cuerpos de agua y cultivos
Otros tipos de vegetación	otv	Pastizal gipsofilo y halófilo, vegetación de dunas, palmar
Pastizal natural	pn	Cualquier pastizal natural incluyendo sabanas, pastizal-huizachal y pradera de alta montaña
Pastizal inducido y cultivado	pi	Pastizales inducidos y cultivados
Selva	S	Sin vegetación aparente
Sin vegetación aparente	sv	
Vegetación hidrófila	vh	Manglar, tular, popal y vegetación de galería

### 3. MODELO DE PROYECCIÓN DE USO DEL SUELO

El análisis del cambio de uso de suelo ha recibido varios tratamientos con el fin de poder identificar los patrones espaciales y temporales de la conversión del uso del suelo y entender sus causas y consecuencias. Entre estos tratamientos resaltan los de geógrafos y biólogos que han desarrollado modelos espaciales y explícitos de cambio de uso del suelo en varias escalas y fundamentalmente a nivel nacional (Velázquez, et al., 2002), aunque existen algunos análisis más finos, regionales, locales o a nivel parcelas y/o paisajes (Mendoza y Dirzo, 1999). La modelación y prognosis del LUCC tiene como objetivo identificar la magnitud y distribución espacial del cambio en el uso del suelo y estimar su probabilidad de ocurrencia futura bajo el supuesto de que las técnicas de manejo del suelo y las necesidades de uso continuarán siendo similares en el futuro cercano (Sandoval y Real, 2005). En teoría este análisis incluye no solo los procesos más comunes como la deforestación y desertificación, sino también la conversión a praderas y bosques artificiales.

Los análisis de LUCC realizados a la fecha muestran un progreso significativo en mejorar las bases de datos (e.g., imágenes de satélite), así como en conceptualizar los procesos geográficos, ambientales y socioeconómicos que están asociados con el cambio de uso del suelo. No obstante ello, aun persiste una menor atención al desarrollo de modelos que sirvan para entender plenamente el proceso económico (i.e. componente humano) alrededor del cambio de uso del suelo a diferentes niveles de análisis (Deininger y Minten, 2002). Desde una perspectiva macro, los modelos de LUCC se enfocan en los determinantes del cambio a lo largo de países (*cross-country analysis*); por ejemplo, Cropper y Griffiths (1994) estimaron el efecto de la población y crecimiento económico en la deforestación en países tropicales y encontraron un efecto positivo de la primera y solo en África identificaron un efecto positivo del segundo.

A nivel micro se han desarrollado algunos modelos para explicar los causales de cambio de uso del suelo, fundamentalmente para explicar el proceso de deforestación. Tales modelos usualmente relacionan la elección (toma de decisiones) individual del dueño de la tierra con los resultados del cambio de uso del suelo, bajo supuestos de racionalidad y maximización de beneficios por parte del tomador de decisiones (Irwin y Geoghegan, 2001). La literatura a este nivel de análisis es relativamente reciente. Nelson y Hellerstein (1997) muestran el uso de datos geográficos para analizar decisiones de uso del suelo en la que los costos de transacción derivados de la accesibilidad son un componente importante en las decisiones de uso; por su parte, Chomitz y Gray (1996) modelan un productor agrícola maximizado de ganancias que decide usar la tierra en la actividad productiva más rentable; la puesta en práctica de este concepto se ha dado a varios niveles desde el nivel estatal (Torres y Flores, 2001) hasta el nivel municipal (Deininger y Minten, 1999) con variaciones a nivel de comunidad (Alix-García, 2007).

El cambio de uso del suelo más estudiado y que más atención genera es el proceso de deforestación. Este proceso que usualmente se observa de cambio de uso forestal a agrícola o ganadero se ha convertido en uno de los problemas ambientales más importantes. La pérdida de cobertura arbórea tiene varias externalidades negativas tanto económicas como ambientales. Así, el análisis se ha enfocado en tratar de determinar causales de deforestación a varias escalas (territoriales) de análisis. En el estudio sobre los causales (directos e indirectos) de deforestación sobresalen los trabajos de Lambin, (1994); Deininger y Minten, (1997); Kaimowitz y Angelsen, (1998); Geist y Lambin, (2001) que se enfocan en variables económicas y sociales como móviles de las decisiones de cambio de uso forestal a agrícola o pecuario. Existe además otro enfoque, particularmente aplicable a suelos de propiedad común, que atribuye el cambio de uso del suelo a problemas de gobernabilidad de los propietarios de los terrenos forestales (Ostrom y Nagendra, 2006). El punto inicial de análisis de la deforestación siempre identifica a los agentes básicos: productores agrícolas, pecuarios, forestales, compañías plantadoras (forestales o frutícolas) o incluso desarrolladores inmobiliarios a gran escala. El efecto de estos agentes se evalúa de manera individual y usualmente se analiza de manera independiente, con lo que se pierde información sobre los determinantes de las decisiones en un contexto donde existen varias alternativas de cambio de uso del suelo (Mas et al., 2002).

Así, las decisiones de los agentes causales de deforestación se basan en sus preferencias, cultura y recursos disponibles con base en variables exógenas a ellos, tales como los precios (mercado de bienes y servicios), la tecnología, accesibilidad, la estructura de gobierno (Instituciones) y la información. De aquí que estos parámetros de decisión sean frecuentemente identificados como causas inmediatas de cambio de uso del suelo. Estos dos conjuntos de variables determinan simultáneamente las opciones disponibles para cada uno de los agentes, así como los incentivos para la elección de algún mecanismo de cambio de uso del suelo. Además, tanto las características de cada agente como las variables de decisión son determinadas por fuerzas (variables) de mayor escala como son variables a nivel macroeconómico, tales como instrumentos de política y gobernabilidad, entre otras (Angelsen y Kaimowitz, 1999). En general se acepta que los agentes causales de deforestación de mayor impacto son los productores agrícolas y ganaderos y se reconocen que los productores forestales ejercen un menor impacto en este proceso. No obstante, se reconoce también que el desarrollo silvícola en una región asociado a la provisión de bienes públicos y a la mejora en la accesibilidad es un promotor inicial de los productores agrícolas y ganaderos que finalmente tendrán mayor impacto en el cambio de uso del suelo. De este modo, se observa que dentro de los causales inmediatos de la deforestación se pueden considerar:

- Precios de los productos agrícolas: Conforme la frontera agrícola se hace más rentable es más probable que se registre un cambio de uso del suelo a favor de ella.
- Precios de insumos agrícolas: Aumento en precios de insumos agrícolas que induce el uso de prácticas más extensivas de cultivo, pero no a una reconversión a boscosa.
- Salarios y empleo: Es una variable que notablemente reduce la presión al bosque.
- Disponibilidad de crédito: La mayor parte de los estudios muestran que el acceso al crédito sirve para financiar cambio de uso del suelo.
- Progreso tecnológico: Es poco contundente la evidencia, dado que tecnologías intensivas en mano de obra (producción de frutas y verduras) pueden reducir deforestación en tanto que la oferta laboral sea inelástica.
- Accesibilidad: Variable altamente significativa en determinar cambio de uso del suelo.
- Régimen de propiedad: Existe escasa evidencia de que sea una variable importante y depende en gran medida de la estructura de gobierno local tanto para propiedad privada como para propiedad comunal.
- Precios de madera: Evidencia poco contundente, sin embargo, en países desarrollados (mayor información de mercados) parece haber una relación positiva entre esta variable y el cambio de uso del suelo.

Dentro de los *causales indirectos* (nivel macro) se pueden identificar:

- Población: Mayor población está relacionada con mayor presión sobre usos alternos de rápido retorno; no obstante, la evidencia no es contundente principalmente por las condiciones de endogeneidad de la variable.
- Nivel de ingreso: El mayor ingreso de la población aumenta la demanda de satisfactores (productos agropecuarios y maderables).
- Crecimiento económico: Aumenta la demanda de satisfactores pero diversifica las actividades no agrícolas dando como resultado un efecto mixto.
- Liberación comercial: Precios más altos en el mercado internacional aumentan la deforestación, aunque en algunas situaciones los cambios en el ingreso resultado de la liberación comercial pueden mitigar el cambio de uso del suelo.



Esta evidencia empírica presentada a nivel mundial sugiere que existe una relación importante entre los distintos cambios de uso del suelo y las fuerzas económicas. En este sentido es necesario identificar los patrones regulares de interrelación entre los distintos usos de suelo y la dinámica económica para realizar pronósticos y simulaciones razonables sobre la dinámica de uso del suelo en México<sup>30</sup>.

El cambio entre diversas formaciones se hace evidente al integrar una matriz de transición en periodos como el que se muestra en el Cuadro 40 en donde se compara los inventarios de 1976 y 2000 para México con sus respectivas tasas de conversión<sup>31</sup>. Es importante observar que las categorías con tasas de conversión negativas indican las formaciones que están perdiendo cobertura, mientras que aquellas con tasas positivas se encuentran ganando superficie. De este modo, el Cuadro 40 indica que las categorías “otras coberturas” (incluye los asentamientos humanos), “cultivos” y “pastizales inducidos y cultivados” representan las categorías que más superficie ganan del resto de las formaciones, evidentemente a expensas de las demás categorías. Por el contrario, las categorías de “selvas” seguidas de la “vegetación hidrófila”, los “pastizales naturales”, los “matorrales” y los “bosques” son las formaciones que más terreno pierden proporcionalmente. A pesar de que la tasa de conversión de la categoría “otras coberturas” es muy alta, debe considerarse que esta tasa se estima sobre una base relativamente baja comparada con el enorme impacto que tienen las categorías “cultivos” y “pastizales inducidos y cultivados”, categorías que para el año 2000 representaban más de 41 millones de hectáreas (21% del territorio nacional).

La transición entre diferentes usos del suelo muestra los usos que tienen mayor prioridad. Por ejemplo, para el caso de la categoría “otras coberturas” se observa que los asentamientos humanos toman la mayor parte de su superficie de áreas de cultivo y pastizales, y en menor medida de bosques y selvas. Este proceso es evidente dado que los asentamientos humanos se extienden regularmente en las áreas aledañas, mismas que usualmente están dedicadas a cultivos o la cría de ganado. Extendiendo este análisis a bosques resulta claro que un 60% de la superficie en bosques que deja de serlo pasa a ser “pastizal inducido” mientras que casi un 25% pasa a ser cultivo. Para el caso de selvas, casi 49% de la superficie que deja de serlo pasa a ser pastizal, mientras que cerca del 38% pasa a ser terreno de cultivo. Estas cifras muestran que la transformación de la vegetación primaria de bosques y selvas a pastizales es la principal causa de deforestación, seguida de la transformación de cobertura arbórea a cultivo.

El proceso de cambio de uso del suelo regularmente tiene como punto de partida un deterioro de la vegetación primaria que se acentúa en un cambio de uso del suelo después de un cierto periodo. El proceso de LUCC puede ser muy largo y dependiente de una enorme cantidad de factores; Muñoz *et al.* (2003) en un análisis a nivel píxel identifican a los siguientes factores como los determinantes más importantes: la pendiente del terreno (relación inversa), rendimiento del terreno (relación directa), distancia al centro poblacional más cercano (relación inversa) o a un centro urbano (relación inversa), propiedad social (directa), si el terreno está dentro de una ANP (inversa), si la población es más marginada (directa), si la migración es alta (inversa) y si tiene actividades de aprovechamiento forestal (directa). El efecto de esta última variable sigue siendo controversial dado que existen varios autores que señalan que al haber aprovechamiento forestal existe entonces un fuerte incentivo para conservar las áreas arboladas y la actividad forestal, especialmente aquella que se realiza en ejidos y comunidades que puede brindar un efecto dual: conservación y alivio a la pobreza (Bray y Merino-Pérez, 2004, Bray *et al.*, 2005). Sin embargo, existen otros autores que señalan que la actividad forestal es solamente un paliativo y no contribuye ni a la conservación ni a aliviar la pobreza en tanto no genere suficientes ingresos como para desarrollar actividades económicas alternativas (Wunder, 2001, López-Feldman y Taylor, 2005). En este contexto se encuentran algunos resultados como los de Alix-García *et al.*, (2005) y Alix-García (2007). Finalmente, las selvas tienen una tasa de cambio que duplica a aquella de los bosques templados.

<sup>30</sup> Por ejemplo véase el uso de las matrices de cambio de uso de suelo para realizar proyecciones en el Informe de la Situación del Medio Ambiente en México (SEMARNAT, 2003).

<sup>31</sup> La tasa de conversión ( $\delta$ ) se calcula de acuerdo a la FAO como  $\delta = (S_2 / S_1)^{1/n} - 1$ ; donde  $n$  representa el número de años entre la cobertura en el periodo 1 ( $S_1$ ) y el periodo 2 ( $S_2$ ).

En este caso, el proceso de deterioro puede ser muy rápido a una escala pequeña o muy lenta a una escala grande.

Así, la transformación de vegetación primaria en terreno de cultivo a través de un sistema roza-tumba-quema en una extensión pequeña (como usualmente se realiza) podría no parecer de gran impacto, sin embargo, la fragmentación y deterioro adicional de la vegetación secundaria son consecuencias directas de este proceso de cambio de uso del suelo que se hace en mayores extensiones y con ciclos cada vez más cortos<sup>32</sup>.

## CUADRO 40. MATRIZ DE TRANSICIÓN DE COBERTURAS VEGETALES ENTRE LOS AÑOS 1976 Y 2000 (MILES DE HECTÁREAS)

		2000										
		Bosques	Selvas	Matorral	Vegetación Hidrófila	Otros tipos de vegetación	Pastizales naturales	Pastizales inducidos	Cultivos	Otras coberturas	Total	Tasa de cambio (%)
1976	Bosques	29,720	874	309	1	14	368	2,374	1,533	11	35,204	-0.25
	Selvas	864	27,940	188	156	47	37	4,844	3,626	57	37,759	-0.76
	Matorral	557	223	53,252	35	863	597	2,659	2,439	121	60,746	-0.33
	Vegetación Hidrófila	3	167	80	1,600	68	8	249	114	4	2,294	-0.59
	Otros tipos de vegetación	12	25	544	63	4,267	51	112	238	18	5,332	-0.52
	Pastizales naturales	361	31	667	1	492	7,185	966	766	10	10,478	-0.81
	Pastizales inducidos	787	1,146	358	96	43	70	10,078	2,273	110	14,961	1.72
	Cultivos	818	1,026	679	37	241	308	1,228	21,507	393	26,238	0.90
	Otras coberturas	0	1	0	0	0	0	2	9	222	234	5.99
	Total	33,123	31,433	56,078	1,989	6,035	8,624	22,513	32,505	947	193,246	

Fuente: Velázquez et al., 2002.

Esta información muestra que la predicción de LUCC es una tarea compleja para la que debe contarse no solo con excelentes bases de datos, sino que debe tener cierto nivel de precisión y definir la proyección espacio-temporal a la escala apropiada y considerar para ésta los causales inmediatos e indirectos de relevancia. Evidentemente, la estrategia de proyección debe adaptarse tanto a la disponibilidad de datos como a los objetivos de la proyección entre los cuales no solo destacan las variables que se simularán sino la escala a la cual se aplicará la proyección.

Existen varios modelos que se han utilizado para extender las proyecciones de LUCC a través del tiempo. Las proyecciones de largo plazo regularmente se hacen con modelos estructurales en donde las variables explicativas son: la población, el nivel de empleo, los indicadores sobre provisión de bienes públicos y precios relativos del sector agrícola o pecuario. Tales modelos pueden derivarse con información de corte transversal en grandes muestras o con datos derivados de series de tiempo. Un requisito básico para estos modelos es contar con una buena cantidad de información histórica, dado que la información de corte transversal puede ocultar grandes diferencias de orden sociopolítico, cultural y biofísico difíciles de evaluar en la estimación de LUCC. Otro tipo de modelos de proyección de LUCC lo constituyen los modelos de proyección explícita que usan información derivada de percepción remota

<sup>32</sup> La intensificación del sistema roza-tumba-quema es una consecuencia tanto de la reducción de la productividad del suelo en los bosques de segundo crecimiento como de la notable presión del crecimiento poblacional.



(Mertens y Lambin, 1997; Andersen, 1996; LaGro y DeGloria, 1992; y Ludeke *et al.*, 1990; Irwin y Geoghegan, 2001; Muñoz *et al.*, 2003). En estos modelos se identifica una variable dependiente relacionada con LUC, que es usualmente la deforestación. Posteriormente se identifican variables predictoras que pueden ser igualmente “observadas” con procesos de percepción remota como distancias, variables biofísicas (suelo, pendiente, elevación) y ocasionalmente variables (causales) socioeconómicas como población o producción doméstica. Estos modelos mezclan entonces causales inmediatos e indirectos, con lo que se aseguran buenas proyecciones. Irwin y Geoghegan (2001) señalan que estos modelos ajustan los procesos espaciales (micro) muy bien, sin embargo son menos exitosos en explicar el comportamiento humano que lleva al proceso de cambio de uso del suelo. Adicionalmente, su carácter de modelo de proyección explícito ocasionalmente obliga a mezclar variables endógenamente determinadas con lo que se reduce la consistencia en la estimación de parámetros. Otro ejemplo de modelos de proyección son los modelos híbridos (Irwin y Geoghegan, 2001) que incluyen un componente de estimación o proyección pero tienen un componente adicional de simulación. La simulación regularmente toma información de la proyección realizada como paso inicial para predecir el patrón espacial de LUC bajo diferentes escenarios. Los primeros modelos fueron matrices de transición simples que calculaban el cambio porcentual de cada cobertura durante un periodo de tiempo, asumiendo que las probabilidades de transición permanecen constantes por largos periodos (Baker, 1989, Muller y Middleton, 1994). Modelos más sofisticados predicen las probabilidades de transición como una función de otras variables explicativas y no solo como función de previos usos del suelo. Modelos explícitos espaciales. Estos modelos son similares a los modelos de predicción explícita, sin embargo usan como base la decisión de cambio de uso de cada propietario dentro de entorno espacial y con un fuerte componente de información económica tanto de productividad de usos alternos de suelo como de información de mercado (Chomitz y Gray, 1996, Nelson y Hellerstein, 1997; Pfaff, 1999). Estos modelos tienen un elevado nivel de precisión y modelan muy bien tanto el componente geográfico y local, como las decisiones del propietario del suelo. Sin embargo, requieren de una importante cantidad de información y por la misma razón su uso se complica en proyecciones de largo plazo.

Las proyecciones de uso de suelo se realizaron con base en la construcción de matrices de transición de probabilidad de cambio de uso de suelo elaboradas a través de cadenas de Markov (Books, 2002). Este método garantiza la consistencia entre los diferentes uso de suelo. Así, el Cuadro 40 presenta la matriz de transición de cambio de uso de suelo históricas. La matriz de probabilidades de transición, estimada a través de cadenas de Markov, se presenta en el Cuadro 41 (Velázquez, *et al.*, 2002).

## CUADRO 41. MATRIZ DE PROBABILIDADES DE TRANSICIÓN DE COBERTURAS VEGETALES (MILES DE HECTÁREAS)

		2000									
		Bosques	Selvas	Matorral	Vegetación Hidrófila	Otros tipos de vegetación	Pastizales naturales	Pastizales inducidos	Cultivos	Otras coberturas	Total
1976	Bosques	0.9062	0.0078	0.0026	0.0000	0.0001	0.0037	0.0559	0.0236	0.0001	1.0000
	Selvas	0.0157	0.8244	0.0032	0.0012	0.0004	0.0011	0.0865	0.0663	0.0011	1.0000
	Matorral	0.0027	0.0023	0.9401	0.0003	0.0056	0.0029	0.0257	0.0198	0.0007	1.0000
	Vegetación Hidrófila	0.0002	0.0348	0.0061	0.8977	0.0142	0.0006	0.0236	0.0220	0.0008	1.0000
	Otros tipos de vegetación	0.0008	0.0014	0.1139	0.0077	0.8389	0.0011	0.0112	0.0239	0.0010	1.0000
	Pastizales naturales	0.0144	0.0012	0.0144	0.0001	0.0014	0.8255	0.0986	0.0436	0.0008	1.0000
	Pastizales inducidos	0.0139	0.0297	0.0185	0.0025	0.0013	0.0028	0.8610	0.0677	0.0027	1.0000
	Cultivos	0.0093	0.0225	0.0130	0.0007	0.0021	0.0042	0.0251	0.9162	0.0069	1.0000
	Otras coberturas	0.0050	0.0009	0.0027	0.0001	0.0006	0.1452	0.0078	0.0257	0.8120	1.0000
	Total	0.9988	0.9673	1.1422	0.7225	0.9066	0.7367	1.1916	1.3552	0.9790	1.0000

Fuente: Estimación propia con datos de Velázquez *et al.*, 2002.

### Método de cadenas de Markov

El procedimiento de cadenas de Markov (Boroks, 2002) es estocástico en el sentido de que el resultado del modelo (la distribución de categorías) se basa en las probabilidades de transición entre un estado  $i$  y uno  $j$  ( $P_{ij}$ ). Tales probabilidades se pueden asumir constantes (Balzter, 2000) o bien variar de acuerdo a causales indirectos o inmediatos (Chomitz y Gray, 1996; Sandoval y Real, 2005). Adicionalmente, la suma de las probabilidades de transición de un estado  $i$  a todos los posibles

estados debe ser equivalente a la unidad; esto es,  $\sum_j P_{ij} = 1, \forall i = 1, 2, 3, \dots, m$ ; donde  $i$  y  $j$  representan los subíndices

de las  $m$  diferentes categorías de vegetación o uso del suelo. Para este tipo de modelos las probabilidades de transición son usualmente derivadas de una muestra de transiciones que ocurren durante un intervalo de tiempo. Normalmente se asume que la cadena de Markov es un proceso de primer orden, lo que significa que la probabilidad de un conjunto particular de resultados depende solo de la distribución actual de estados y las probabilidades de transición; de esta forma la historia de eventos no tiene alguna relación con las futuras probabilidades. Este supuesto permite predecir un estado futuro con solo conocer el estado actual y la matriz de transición a través de la ecuación de cadena de Markov:

$$\mathbf{b}_{t+1} = \mathbf{P}\mathbf{b}_t$$

Donde  $\mathbf{b}_t$  es el vector columna que representa la fracción de tierra en cada una de las  $m$  categorías en el periodo  $t$  y  $\mathbf{P}$  es la matriz de transición de tamaño  $m \times m$ . Otro supuesto de este procedimiento es la estacionalidad de la matriz de transición, esto es, se asume una  $\mathbf{P}$  invariable lo que permite estimar la fracción de tierra en cada categoría en periodos futuros. Por ejemplo la distribución para el periodo  $t + 3$  estaría dada por:  $\mathbf{b}_{t+3} = \mathbf{P}\mathbf{b}_{t+2} = \mathbf{P}^2\mathbf{b}_{t+1} = \mathbf{P}^3\mathbf{b}_t$ ; de esta forma, se puede construir una tendencia de coberturas en años posteriores.

A fin de corregir el problema e incluir efectos exógenos o endógenos al proceso de cambio de uso del suelo, estos modelos se han modificado incluyendo nuevos estados (categorías), de tal forma que se aumenta la información para la transición. No obstante esta estrategia requiere una gran cantidad de datos de diversas observaciones panel y resulta difícil llevarla a la práctica a nivel nacional. Así, la contribución de variables exógenas y endógenas en las probabilidades de transición se ha modelado modificando la ecuación de cadena de Markov a la forma:

$$\mathbf{b}_{t+1} = \mathbf{P}[f(t)]\mathbf{b}_t$$

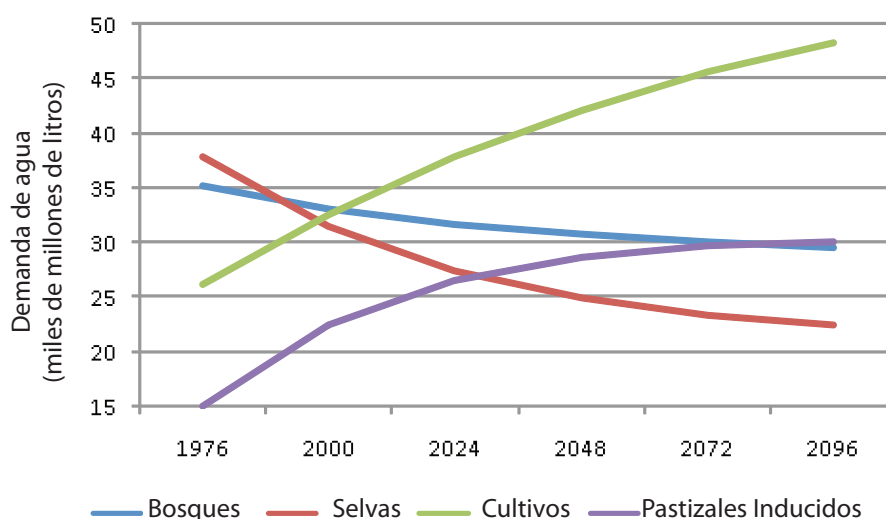
Donde  $f(t)$  es una función que define las probabilidades de transición en el tiempo  $t$ , de tal forma que las probabilidades de transición se redefinen como dependientes de una función integrada por un conjunto de variables de interés a través de un modelo lineal (o no lineal) definido como:

$$P_{ij} = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon$$

Donde la  $X_k$  representa la  $k$ -ésima variable adicional y las  $\beta_k$ 's son parámetros del modelo. Esta estrategia se ha utilizado exitosamente, por ejemplo, para evaluar el efecto de la temperatura y densidad en poblaciones de ácaros (Woolhouse y Harmsen 1987). En el caso de modelos de paisaje se han incluido variables socioeconómicas o condiciones climáticas e incluso indicadores de la composición de los tipos de coberturas (Henderson y Wilkins, 1975; Marsden, 1983; Balzter, 2000; Benabdellah *et al.*, 2003) o variables socioeconómicas (Chomitz y Gray, 1996; Sandoval y Real, 2005).

La Gráfica 87 muestra la tendencia esperada en la cobertura de las categorías bosques, selvas, cultivos y pastizales inducidos, estimadas a partir de la matriz de cambios definida por Velázquez *et al.*, (2002).

**Gráfica 87. Proyección de las coberturas “bosques”, “selvas”, “cultivos” y “pastizales inducidos” con base en la transición observada entre 1976-2000**



Fuente: Estimación propia con base en información de Velázquez et al., 2002

#### 4. ESTIMACIÓN DEL EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Con objeto de relacionar las proyecciones de cambio de uso del suelo con posibles variaciones en clima, se modelaron las probabilidades de transición como función de variables climáticas y algunas otras variables de control. Para ello se consideró a cada entidad federativa como una unidad independiente en la que la probabilidad de transición de una a otra formación está determinada por variables de estado básicas, así como variables climatológicas. Para modelar cada una de las probabilidades se aplicó un modelo logístico de la forma:

$$(19) \quad P_{ij} = \frac{e^{(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \dots + \beta_n X_n)}}{1 + e^{(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \dots + \beta_n X_n)}}$$

Donde  $P_{ij}$  representa la probabilidad de transición de la formación  $i$  a la  $j$  durante el periodo de análisis (el periodo entre diferentes evaluaciones equivalente a 7 años), las  $\beta$ 's representan parámetros del modelo y las  $x$ 's corresponden a cada una de las variables explicativas e independientes de la variación en la probabilidad de transición. Por construcción, las  $P_{ij}$ 's tienen la restricción de que  $\sum P_{ij} = 1, \forall i = 1, 2, 3, \dots, m;$

por lo que el conjunto de probabilidades de transición de la  $i$ -ésima categoría se debe modelar en forma simultánea y con la restricción de que la suma de probabilidades sea igual a la unidad.

Los resultados generales de los ajustes muestran que las actividades humanas constituyen la principal fuente de deterioro y transformación de los ecosistemas naturales. Las estimaciones de cambio de uso del suelo en México son consistentes en señalar que existe una pérdida importante de selva y bosque en las últimas décadas y que la pérdida de selvas es proporcionalmente mayor que la de bosques. Los agentes causales de la deforestación de mayor impacto son los productores agrícolas y ganaderos y se reconoce que los productores forestales ejercen un menor impacto en este proceso. Las decisiones de los agentes causales de la deforestación incluyen preferencias, recursos disponibles, precios relativos (mercado de bienes y servicios), tecnología, accesibilidad, estructura de gobierno (instituciones), cultura e información. La evidencia empírica sugiere entonces que existe una relación importante entre los distintos cambios

de uso de suelo y las fuerzas económicas. Las proyecciones de cambio de uso del suelo con posibles variaciones en clima, asociados a distintos escenarios de cambio climático, se modelaron con las probabilidades de transición como función de variables climáticas y algunas otras variables de control, como el PIB, que es una variable que refleja la tendencia inversa ligada al cambio de uso agrícola, es decir, a un PIB más elevado mayor es la probabilidad de que no se cambie el uso del suelo, lo que se relaciona a la existencia de otras alternativas económicas en la región diferentes a la producción primaria. Los resultados de los pronósticos de cambio de uso del suelo muestran que la mayor parte de la superficie forestal se concentra en zonas de cambio moderado en temperatura e incluso aumentos en la precipitación pluvial, lo que parecería mejorar las condiciones de crecimiento para las masas forestales y empeorar las condiciones de falta de humedad en las zonas áridas y semiáridas. No fue posible evaluar el efecto de aumento en la concentración de algunos gases de efecto invernadero debido a que los modelos de cambio en las formaciones no incorporan este efecto. No obstante, cabría esperar un mayor rendimiento en las masas forestales y pastizales como consecuencia de una mayor concentración de CO<sub>2</sub>, tal y como ha sido reportado por varios autores (Norby *et al.*, 1999, Bolker *et al.*, 2006). La evaluación del cambio de uso del suelo ante un escenario de cambio climático se puede realizar entonces considerando todas las opciones de la superficie ganada o perdida para un uso en específico.

## 5. PROYECCIÓN DE ESCENARIOS DE COBERTURA DE DIFERENTES FORMACIONES CON CAMBIO CLIMÁTICO

La proyección de escenarios se realizó con ayuda de las ecuaciones de predicción de probabilidades de transición. La metodología consistió en calcular los *logits* de la probabilidad de transición de cada formación a todas las otras formaciones para cada entidad federativa. El Cuadro 42 muestra la estimación de la superficie en diferentes formaciones considerando los datos de precipitación y temperatura de la línea basal, esto es, considerando los promedios de estas variables en el periodo de transición (1993-2000). Este cálculo coincide con las estimaciones a nivel nacional definidas por Velázquez *et al.* (2002) para el periodo 1993-2007. Otro dato importante es que la tasa de deforestación coincide en orden de magnitud con las estimaciones de deforestación entre 1990 y 2005. Para la estimación del efecto de cambio climático se consideraron dos escenarios, el escenario A2 y el B1 definidos por el IPCC. El escenario B1 se distingue por tener menor precipitación promedio, fundamentalmente en zonas de baja precipitación así como una menor elevación de la temperatura que el escenario A2.

### CUADRO 42. DINÁMICA DE LA COBERTURA (MILLONES DE HA) DE CADA FORMACIÓN CON BASE EN EL MODELO DE PREDICCIÓN Y LAS PROBABILIDADES DE TRANSICIÓN DEFINIDAS AL AÑO 2000.

Año	Bosque	Matorral	Otras Coberturas	Otros tipos de vegetación	Pastizales inducidos y cultivados	Pastizales naturales	Selvas	Sin vegetación aparente	Vegetación hidrófila	Deforestación anual (miles de ha/año)
1993	34.524	57.792	44.217	5.460	6.389	10.720	32.878	0.941	2.157	
2000	33.854	57.059	47.371	5.344	6.612	10.499	31.273	0.933	2.132	324.953
2007	32.219	54.711	49.922	5.145	11.651	10.130	28.821	0.929	1.548	583.706
2014	31.141	53.268	52.356	5.004	14.071	9.892	27.049	0.932	1.362	407.207
2021	30.115	51.892	54.580	4.873	16.371	9.659	25.427	0.936	1.223	378.338
2028	29.139	50.581	56.626	4.749	18.559	9.431	23.937	0.940	1.115	352.329
2035	28.210	49.329	58.517	4.632	20.643	9.208	22.564	0.943	1.029	328.816

## CUADRO 42. DINÁMICA DE LA COBERTURA (MILLONES DE HA) DE CADA FORMACIÓN CON BASE EN EL MODELO DE PREDICCIÓN Y LAS PROBABILIDADES DE TRANSICIÓN DEFINIDAS AL AÑO 2000. (CONTINUACIÓN)

Año	Bosque	Matorral	Otras Coberturas	Otros tipos de vegetación	Pastizales inducidos y cultivados	Pastizales naturales	Selvas	Sin vegetación aparente	Vegetación hidrófila	Deforestación anual (miles de ha / año)
2042	27.324	48.134	60.273	4.522	22.631	8.990	21.297	0.947	0.958	307.487
2049	26.480	46.992	61.909	4.416	24.528	8.777	20.125	0.950	0.899	288.074
2056	25.676	45.899	63.437	4.316	26.341	8.569	19.037	0.953	0.849	270.347
2063	24.908	44.854	64.868	4.219	28.075	8.366	18.026	0.956	0.805	254.111
2070	24.175	43.852	66.210	4.127	29.735	8.167	17.084	0.959	0.766	239.198
2077	23.475	42.893	67.472	4.038	31.327	7.973	16.206	0.962	0.731	225.464
2084	22.806	41.973	68.659	3.953	32.853	7.783	15.385	0.965	0.699	212.783
2091	22.249	41.303	69.629	3.880	33.964	7.734	14.682	0.965	0.670	180.039

La proyección de la dinámica de las diferentes coberturas para el escenario A2 se muestra en el Cuadro 43 y la del escenario B1 en el Cuadro 44. En términos generales, la tendencia de cambio de uso del suelo motivada por factores inmediatos e indirectos continúa bajo un escenario de cambio climático (A2 o B1). Sin embargo, se observa que la deforestación se reduce como resultado de que se torna relativamente menos atractivo el cambio a uso agrícola debido a que se aumenta la temperatura y se reduce la precipitación fuera del rango óptimo de desarrollo de cultivos. De esta forma la deforestación esperada con el cambio climático es relativamente menor aunque debe considerarse que la migración agrícola de zonas áridas puede incidir negativamente en el mantenimiento de la cobertura vegetal; asimismo puede presentarse una presión adicional para mantener la producción agrícola en un entorno de menor productividad. Se observa que las mayores diferencias de clima y precipitación se presentan a partir del año 2050, año en el que también se observan las mayores diferencias en el comportamiento de las tendencias. Para el caso de deforestación resulta evidente que el mayor aumento de temperatura del escenario A2, contribuye a hacer menos atractivo el cambio de uso en tales circunstancias.

## CUADRO 43. DINÁMICA DE LA COBERTURA (MILLONES DE HA) DE CADA FORMACIÓN CON BASE EN EL MODELO DE PREDICCIÓN Y EL ESCENARIO A2 DE CAMBIO CLIMÁTICO CON LAS PROBABILIDADES DE TRANSICIÓN CALCULADAS PARA CADA AÑO DE PROYECCIÓN.

Año	Bosque	Matorral	Otras Coberturas	Otros tipos de vegetación	Pastizales inducidos y cultivados	Pastizales naturales	Selvas	Sin vegetación aparente	Vegetación hidrófila	Deforestación anual (miles de ha / año)
1993	34.524	57.792	44.217	5.460	6.389	10.720	32.878	0.941	2.157	
2000	33.854	57.058	47.370	5.344	6.612	10.499	31.273	0.933	2.132	324.914
2007	32.654	38.901	56.921	5.050	19.612	10.074	28.649	0.925	1.544	512.688
2014	32.084	36.426	59.374	4.718	21.775	9.504	27.383	0.926	1.711	244.425

**CUADRO 43. DINÁMICA DE LA COBERTURA (MILLONES DE HA) DE CADA FORMACIÓN CON BASE EN EL MODELO DE PREDICCIÓN Y EL ESCENARIO A2 DE CAMBIO CLIMÁTICO CON LAS PROBABILIDADES DE TRANSICIÓN CALCULADAS PARA CADA AÑO DE PROYECCIÓN. (CONTINUACIÓN)**

Año	Bosque	Matorral	Otras Coberturas	Otros tipos de vegetación	Pastizales inducidos y cultivados	Pastizales naturales	Selvas	Sin vegetación aparente	Vegetación hidrófila	Deforestación anual (miles de ha /año)
2021	31.299	33.008	62.148	4.515	25.010	9.155	25.818	0.928	1.610	320.324
2028	30.535	30.424	64.372	4.329	27.769	8.818	24.368	0.929	1.521	301.410
2035	29.794	28.414	66.203	4.155	30.173	8.495	23.021	0.930	1.442	283.965
2042	29.076	26.809	67.742	3.993	32.304	8.184	21.770	0.930	1.371	267.890
2049	28.548	26.482	66.277	4.016	35.246	7.920	21.032	0.933	1.243	165.468
2056	27.891	25.348	67.335	3.888	37.059	7.641	19.963	0.934	1.180	234.188
2063	27.254	24.388	68.265	3.766	38.711	7.374	18.963	0.934	1.122	222.349
2070	26.637	23.561	69.090	3.651	40.227	7.120	18.024	0.934	1.069	211.259
2077	26.040	22.840	69.829	3.541	41.624	6.877	17.144	0.934	1.021	200.995
2084	25.461	22.202	70.494	3.436	42.919	6.645	16.317	0.934	0.977	191.338
2091	24.965	21.934	70.879	3.348	43.743	6.630	15.602	0.933	0.935	165.036

**CUADRO 44. DINÁMICA DE LA COBERTURA (MILLONES DE HA) DE CADA FORMACIÓN CON BASE EN EL MODELO DE PREDICCIÓN Y EL ESCENARIO B1 DE CAMBIO CLIMÁTICO CON LAS PROBABILIDADES DE TRANSICIÓN CALCULADAS PARA CADA AÑO DE PROYECCIÓN.**

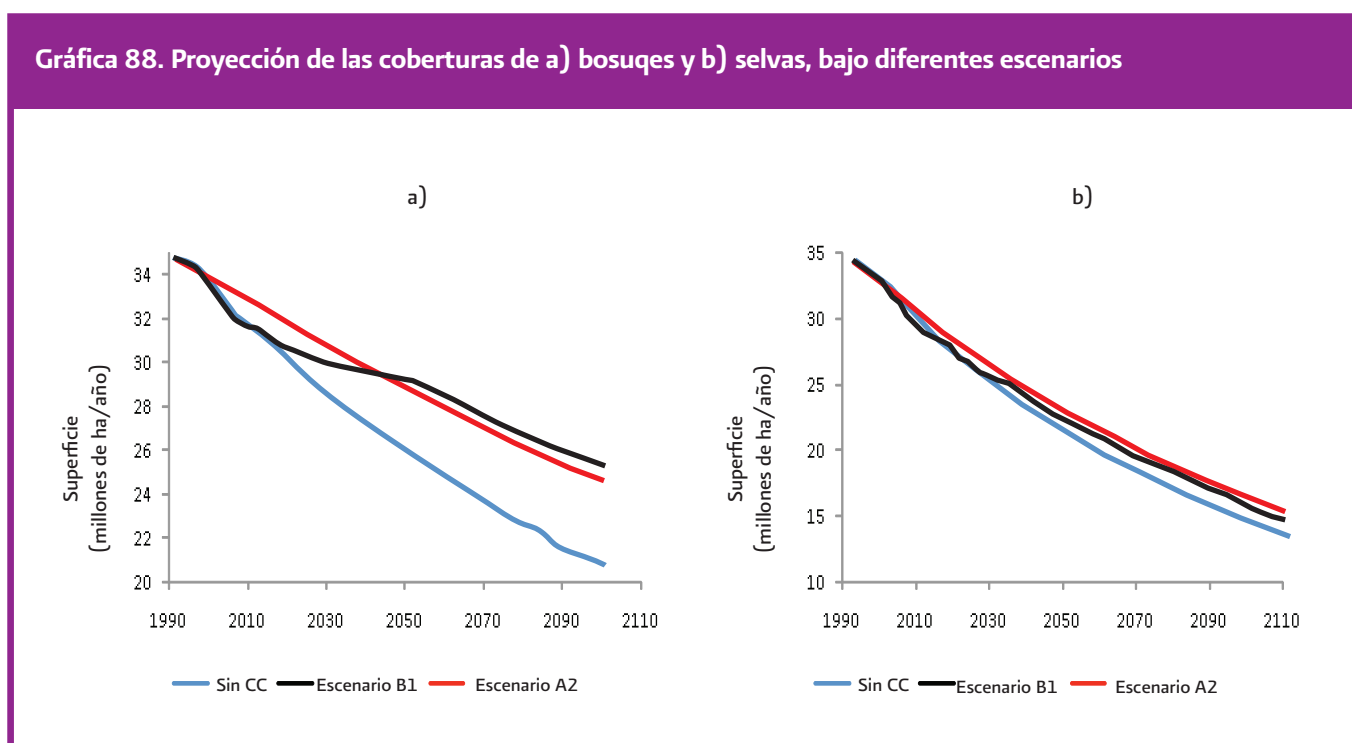
Año	Bosque	Matorral	Otras Coberturas	Otros tipos de vegetación	Pastizales inducidos y cultivados	Pastizales naturales	Selvas	Sin vegetación aparente	Vegetación hidrófila	Deforestación anual (miles de ha /año)
1993	34.524	57.792	44.217	5.460	6.389	10.720	32.878	0.941	2.157	
2000	33.854	57.058	47.370	5.344	6.612	10.499	31.273	0.933	2.132	325.059
2007	32.974	39.004	57.071	5.064	19.664	10.100	28.724	0.927	1.548	489.629
2014	32.278	36.647	59.734	4.746	21.907	9.561	27.549	0.932	1.722	267.339
2021	31.555	33.279	62.658	4.552	25.215	9.230	26.030	0.935	1.623	320.324
2028	30.854	30.741	65.043	4.374	28.058	8.910	24.622	0.938	1.537	301.410
2035	30.173	28.775	67.045	4.208	30.556	8.603	23.314	0.941	1.460	283.965
2042	29.514	27.213	68.763	4.054	32.791	8.307	22.098	0.944	1.391	267.890
2049	28.752	25.099	70.928	3.998	35.265	8.028	20.822	0.945	1.239	291.136

**CUADRO 44. DINÁMICA DE LA COBERTURA (MILLONES DE HA) DE CADA FORMACIÓN CON BASE EN EL MODELO DE PREDICCIÓN Y EL ESCENARIO B1 DE CAMBIO CLIMÁTICO CON LAS PROBABILIDADES DE TRANSICIÓN CALCULADAS PARA CADA AÑO DE PROYECCIÓN. (CONTINUACIÓN)**

Año	Bosque	Matorral	Otras Coberturas	Otros tipos de vegetación	Pastizales inducidos y cultivados	Pastizales naturales	Selvas	Sin vegetación aparente	Vegetación hidrófila	Deforestación anual (miles de ha/año)
2056	28.124	23.990	72.333	3.868	37.118	7.750	19.762	0.948	1.184	241.217
2063	27.516	23.042	73.599	3.744	38.835	7.483	18.771	0.950	1.135	228.305
2070	26.928	22.217	74.752	3.627	40.438	7.226	17.846	0.952	1.091	216.299
2077	26.358	21.488	75.810	3.516	41.942	6.980	16.978	0.954	1.050	205.251
2084	25.808	20.836	76.787	3.409	43.359	6.745	16.165	0.956	1.012	194.919
2091	25.339	20.544	77.473	3.319	44.293	6.714	15.463	0.956	0.977	167.195

La simulación de cambio climático al año 2091 muestra muy poca variación con respecto a la proyección de la línea base para algunas formaciones. Destaca el hecho de que bajo el escenario de cambio climático existe una menor reducción de la superficie arbolada (bosques y selvas) como se puede apreciar en la Gráfica 88.

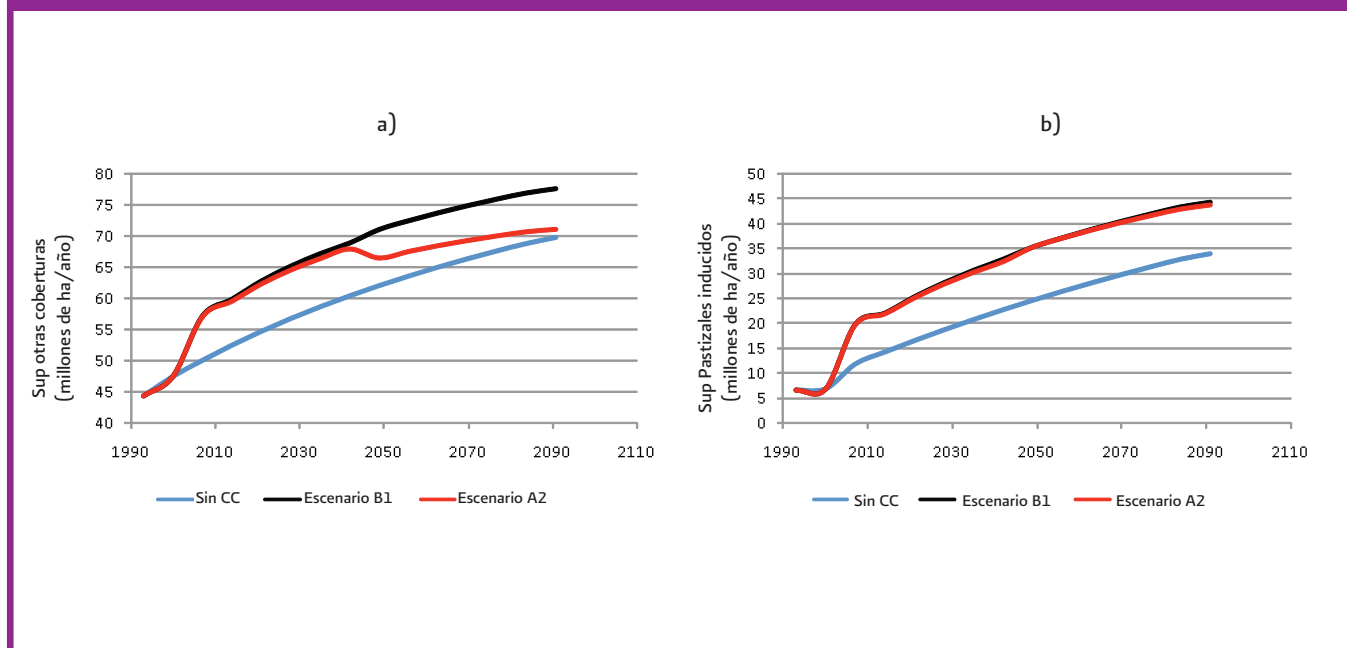
**Gráfica 88. Proyección de las coberturas de a) bosques y b) selvas, bajo diferentes escenarios**



La mayor conservación<sup>33</sup> (relativa) de la superficie arbolada está relacionada con el hecho de que las zonas forestales (fundamentalmente en bosques dado que este efecto no es tan notorio para selvas) se distribuyen en regiones del país donde se predicen aumentos de temperatura poco drásticos, así como aumentos en precipitación; tales incrementos están en un rango donde se hace menos atractivo el cambio de uso del suelo de forestal a cultivo, favoreciendo la conservación de la superficie arbolada.

La tendencia básica de cambio de uso de bosque o selva a cultivo o pastizal inducido continúa. Al parecer la mayor temperatura y menor precipitación en algunas regiones implica que sean atractivos los cambios de uso del suelo a la actividad agrícola o pecuaria. Como se puede apreciar en la Gráfica 89 tales cambios hacen que la superficie en cultivos y aquella en pastizales inducidos incrementen ante un escenario de cambio climático, lo que contrasta con la proyección de menor superficie forestal (bosque o selva) convertida a estos usos. El resultado es explicable no solo por la tendencia natural a ampliar la frontera agrícola y pecuaria, sino también porque las condiciones de extrema temperatura y menor precipitación hacen que algunas formaciones no puedan habitar ciertas regiones. Ejemplos de estas formaciones con poca holgura de adaptación son los pastizales naturales, las formaciones compuestas por palmares, vegetación halófila y gipsófila y de dunas costeras, así como la vegetación hidrófila. Tales formaciones, tienen una notable reducción ante un escenario de cambio climático (Gráfica 90), básicamente porque ya ocupan condiciones extremas de precipitación y temperatura. Un caso que destaca es la formación de matorrales, aparentemente más vulnerable ante el cambio climático por la condición extrema en la que se encuentran y por su extensión en el país. Esta formación ya habita zonas en límites de precipitación y alta temperatura. Un cambio que acentúe estas condiciones limitantes da por resultado una menor cobertura de esta formación que de acuerdo a las proyecciones se transforma en otras coberturas.

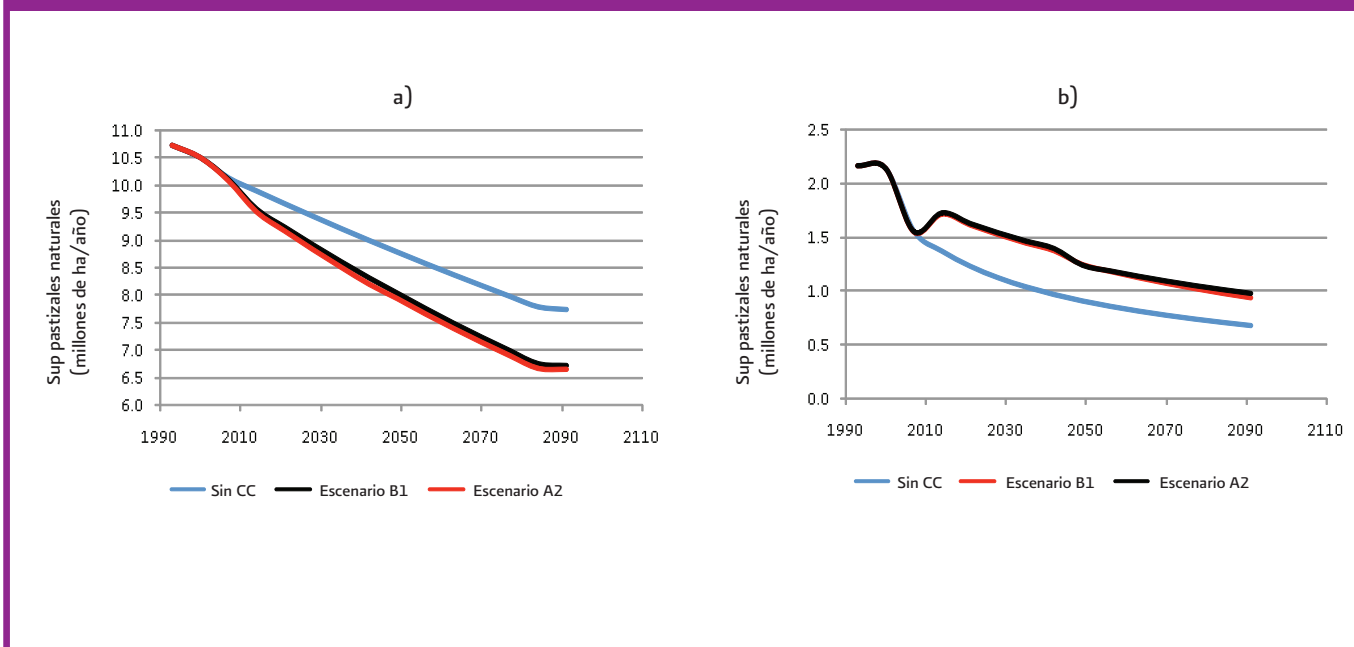
**Gráfica 89. Proyección de las coberturas de a) otras coberturas y b) pastizales inducidos y cultivados, bajo diferentes escenarios**



<sup>33</sup> Se debe aclarar que las proyecciones señalan que el proceso de pérdida de superficie forestal continúa aunque se reduce la tasa de pérdida de superficie arbolada

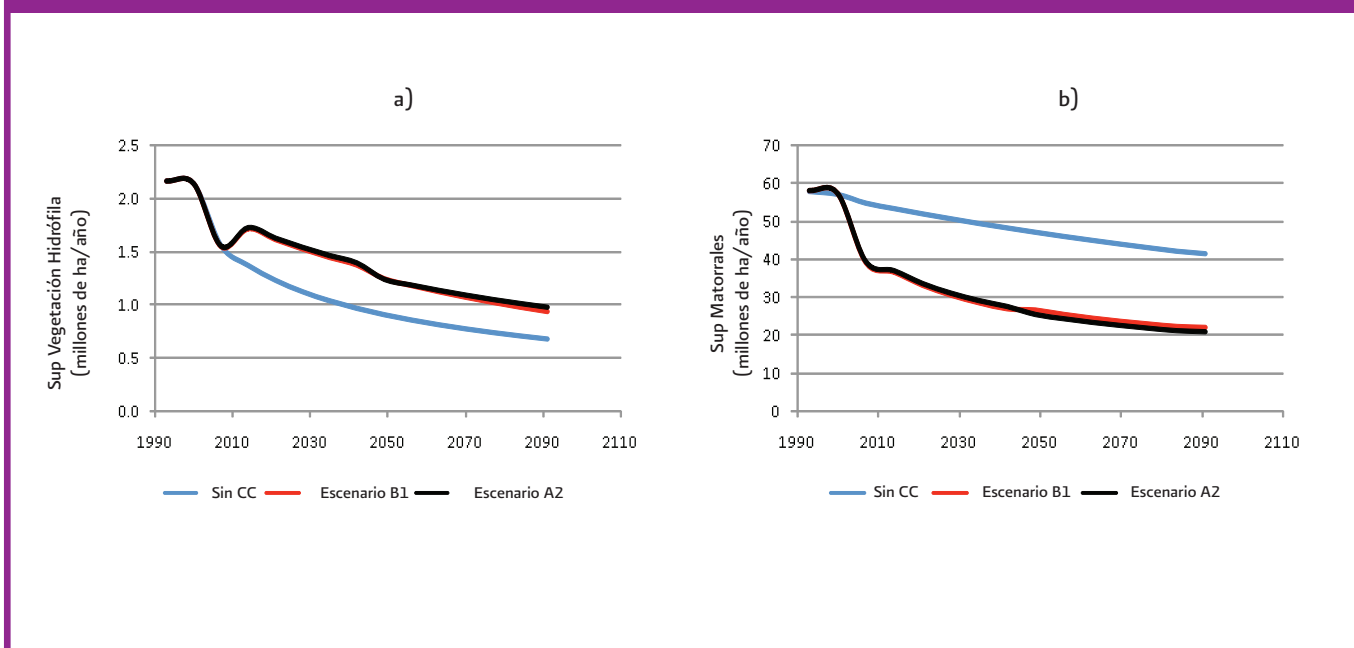


**Gráfica 90. Proyección de las coberturas de a) pastizales naturales y b) vegetación hidrófila, bajo diferentes escenarios**



Una formación contrastante es el caso de la vegetación hidrófila, adaptada a condiciones de climas de alta precipitación con extremos altos tanto en precipitación como en temperatura, pero que por su ubicación no depende en gran medida de las reducciones de precipitación. Ante un escenario de mayor temperatura (en distribución extrema) y menor precipitación las condiciones para sobrevivir de esta formación aumentan y hacen que estos terrenos sean atractivos para este uso (Gráfica 91).

**Gráfica 91. Proyección de las coberturas de a) vegetación hidrófila y b) matorrales, bajo diferentes escenarios**



## 6. ESTIMACIÓN DE COSTOS Y BENEFICIOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO

La evaluación del cambio de uso del suelo ante un escenario de cambio climático se puede realizar considerando las opciones de la superficie ganada o perdida para un uso en específico. No obstante ello, todas las opciones podrían implicar una enorme variedad de actividades. De este modo, la presente evaluación solo considera tres usos de las coberturas vegetales: uso maderable, captura de carbono y pérdida de inventario de carbono por cambio de uso del suelo. Para la valoración del uso maderable se consideraron los supuestos de existencias maderables comerciales y precios de madera en pie promedio para el año 2008 (Cuadro 45). Estos supuestos consideran el valor en pie y la sola cosecha de volumen comercial. Por su parte, la estimación de captura de carbono siguió la estrategia de evaluación de la aditividad. Para ello se estimó un crecimiento por tipo de vegetación que con ayuda de una estimación de densidad se transformó en peso de materia seca maderable, misma que se transformó en toneladas de carbono a través del factor 0.4269 (Jo y McPherson, 1995). El precio por tonelada de carbono se supuso en US\$ 20 y se aproximó a \$ 200. Finalmente, para la valoración de la pérdida de carbono de los inventarios por cambio de uso y perturbación del suelo se tomaron las estimaciones de Muñoz (1994) (Cuadro 46). Una vez definida la estrategia de valoración se procedió a evaluar el escenario de línea base contra los escenarios A2 y B1 comparando las superficies por tipo de vegetación. La Gráfica 92 muestra la variación del valor (acumulado) del cambio climático en el periodo de proyección para el escenario A2 y la Gráfica 93 lo hace para el escenario B1. Una vez definida la estrategia de valoración se procedió a evaluar el escenario de línea base contra los escenarios A2 y B1 comparando las superficies por tipo de vegetación. Se puede observar que en ambos escenarios durante las primeras etapas de transición existe un costo alto promovido por las extensiones de matorrales que se van reduciendo y que tienen un peso significativo en el inventario de CO<sub>2</sub> que se pierde (Cuadro 47 y 48). Así, hacia finales de la década de 2030's se observa una recuperación del valor en el análisis de costo beneficio derivado del cambio climático (mayor temperatura y menor precipitación); ello asociado a que dejan de perderse grandes extensiones de matorrales y se empieza a perder menos bosque y selva al igual que manglares.

### CUADRO 45. SUPUESTOS DE CÁLCULO DEL VALOR DE ARBOLADO EN PIE

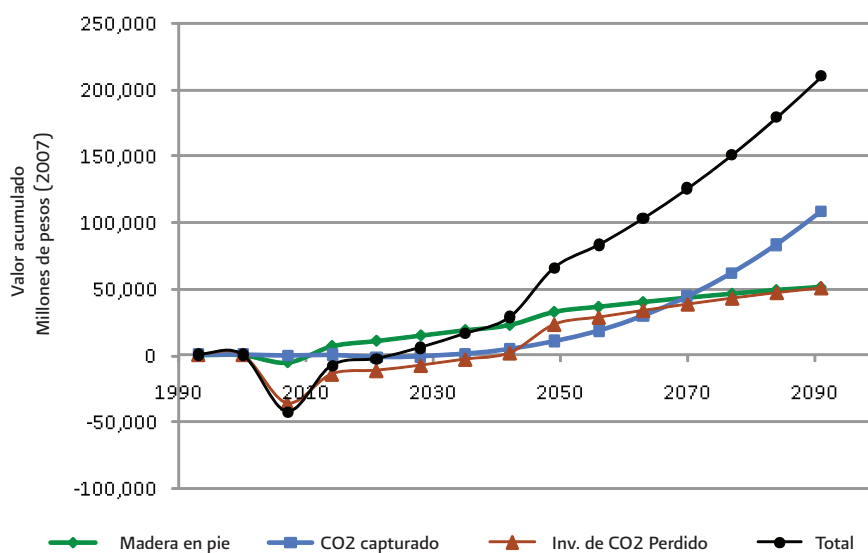
Tipo de vegetación	Volumen comercial m <sup>3</sup> /ha	Derecho de monte (miles \$/m <sup>3</sup> )
Bosque	25	0.700
Matorral	8	0.120
Selva	3.5	1.500
Vegetación hidrófila	4.6	0.120

### CUADRO 46. SUPUESTOS DE CÁLCULO DE CAPTURA DE CARBONO

Tipo de vegetación	Valor de los depósitos de CO <sub>2</sub> (Miles \$/ha)
Bosque	21
Matorral	3
Selva	23

Estos análisis de costo beneficio, a valor presente como porcentaje del PIB, se sintetizan en el Cuadro 47. Se observa que solo en los primeros años existe un costo, y desde el 2035 se presentan ganancias derivadas de los impactos del cambio climático en el cambio de uso de suelo. De esta forma para el 2091 se obtienen beneficios equivalentes, con respecto al PIB, de 0.09% bajo el escenario AZ y de 0.06% en el escenario B1, aplicando en ambos casos, una tasa de descuento del 4% (Cuadro 49). Lo anterior señala que el escenario de cambio climático podría tener, beneficios netos a nivel país, dado que podría reducir los incentivos de cambio de uso del suelo en bosques, selvas y manglares con los consecuentes beneficios ambientales (Cuadros 47 y 48). Por el lado de los costos es muy probable que se pierdan grandes extensiones de matorrales, pastizales naturales y vegetación halófila que sin duda tienen un enorme valor de biodiversidad, pero comparadas con productos maderables y de servicios como la captura de carbono tienen menor impacto al compararse con los beneficios de reducir la tasa de deforestación.

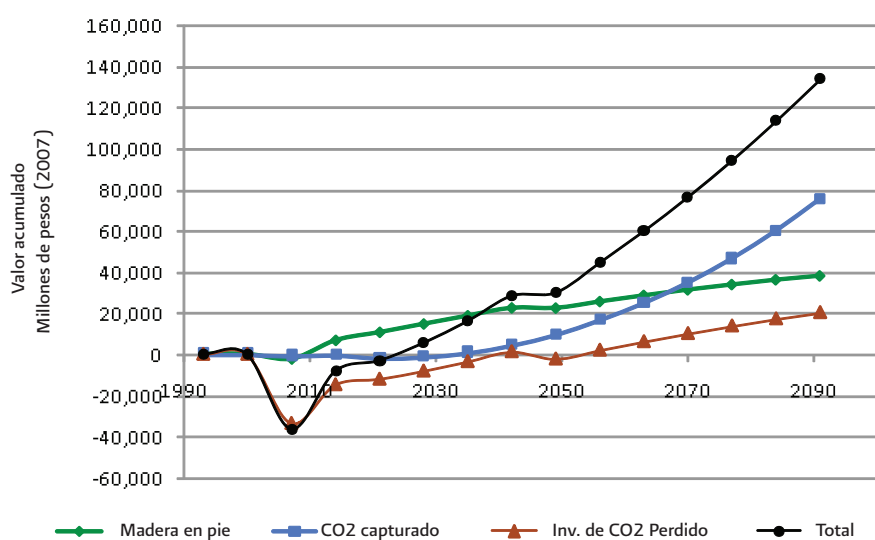
**Gráfica 92. Beneficios-costos (acumulados) del cambio climático evaluado en diferentes bienes y servicios para escenario AZ**



## CUADRO 47. RESUMEN DE ESTIMACIONES DE PÉRDIDAS/GANANCIAS DEL CAMBIO EN EL USO DEL SUELO ASOCIADO AL CC (MILLONES DE PESOS) (A2)

Año	Madera	CO <sub>2</sub> capturado	Inventario de CO <sub>2</sub>	Total
2007	-5,564	-731	-36,630	-42,925
2014	6,765	-292	-14,737	-8,264
2021	10,717	-1,905	-12,034	-3,221
2028	14,786	-1,344	-8,104	5,338
2035	18,806	629	-3,557	15,877
2042	22,682	4,239	1,240	28,161
2049	32,661	10,099	22,613	65,373
2056	36,485	17,987	28,003	82,475
2063	40,036	29,297	33,106	102,439
2070	43,327	43,795	37,898	125,021
2077	46,354	61,624	42,355	150,333
2084	49,137	82,906	46,486	178,529
2091	51,368	107,745	50,024	209,137

Gráfica 93. Beneficios - costos (acumulados) del cambio climático evaluado en diferentes bienes y servicios para escenario B1



## CUADRO 48. RESUMEN DE ESTIMACIONES DE PÉRDIDAS/GANANCIAS (ACUMULADOS) DEL CAMBIO EN EL USO DEL SUELO ASOCIADO AL CC (MILLONES DE PESOS) (B1)

Año	Madera	CO <sub>2</sub> capturado	Inventario de CO <sub>2</sub>	Total
2007	-2,380	-707	-33,454	-36,541
2014	6,765	-268	-14,737	-8,240
2021	10,717	-1,808	-12,034	-3,125
2028	14,786	-1,199	-8,104	5,482
2035	18,806	821	-3,557	16,070
2042	22,682	4,479	1,240	28,401
2049	22,588	9,625	-2,280	29,933
2056	25,805	16,780	1,994	44,578
2063	28,801	25,056	6,111	59,967
2070	31,582	34,927	10,030	76,539
2077	34,141	46,516	13,709	94,367
2084	36,495	59,932	17,148	113,575
2091	38,409	75,269	20,171	133,849

## CUADRO 49. COSTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO POR PÉRDIDAS/GANANCIAS POR CAMBIO EN EL USO DEL SUELO (VALOR PRESENTE EN MILLONES DE PESOS)

Año	Costo del CC			Porcentaje del PIB		
	Tasa de descuento			Tasa de descuento		
	0.5%	2%	4%	0.5%	2%	4%
	Escenario A2					
2049	-77,476	-33,795	-11,392	-0.95	-0.41	-0.14
2091	-137,557	-39,629	-7,756	-1.68	-0.48	-0.09
Escenario B1						
2049	-34,913	-16,893	-6,524	-0.43	-0.21	-0.08
2091	-88,037	-25,363	-4,964	-1.07	-0.31	-0.06

### EVENTOS EXTREMOS: INCENDIOS FORESTALES

Los incendios forestales son un proceso primario que influye en la composición de la vegetación y su estructura; en efecto, el fuego coadyuva a darle forma al paisaje y tiene influencia en los ciclos biogeoquímicos, como el del carbono (Flannigan *et al.*, 2000). El régimen de incendios tiene seis componentes: frecuencia de los incendios, tamaño, intensidad, estación en el que ocurre, tipo y severidad. Todo ello incide, de diferentes formas, en los ciclos de vida de las especies en los ecosistemas; por ejemplo en caso de que un incendio se genere en el periodo de reproducción de semillas, la recuperación será más gradual (Whelan, 1995). Asimismo, algunas especies de árboles tienen la capacidad de regenerarse significativamente, mientras que otras se regeneran de forma más fortuita pero sólo en la ausencia de futuros incendios. La respuesta de la fauna a los incendios depende de las especies (Barlow *et al.*, 2002) pero

finalmente depende de la severidad del incendio. La fragmentación y el cambio de la cobertura vegetal interactúan sinérgicamente para exponer más a los bosques a los incendios y consecuentemente aumenta el riesgo de incendios no intencionados (Cochrane, 2001).

La actividad de los incendios se ve fuertemente influida por cuatro factores: las condiciones meteorológicas, el clima, combustibles, agentes de encendido y las actividades humanas (Johnson, 1992). En este sentido, los incendios forestales y el cambio climático mantienen una relación bidireccional. Por un lado, los aumentos predichos en niveles de CO<sub>2</sub> y deforestación generan climas más secos y cálidos (Costa y Foley, 2000, Zhang *et al.*, 2001, Defries *et al.*, 2002), lo que incide en un aumento en la quema de bosques. Por el otro, los incendios forestales liberan hacia la atmósfera el carbono contenido en la vegetación y en los suelos que se queman. Debido a que en muchas ocasiones los incendios forestales consumen vastas extensiones de vegetación, se emiten a la atmósfera grandes volúmenes de CO<sub>2</sub>.

Las tendencias de incremento en los incendios forestales muestran, en la literatura valores muy variados, por ejemplo Flanigan *et al.*, (2000) pronostica un aumento de entre 74-118% de la superficie quemada para el final de este siglo en Canadá, mientras que Price y Rind (1994) sugieren que los daños causados por los incendios aumentará en un 44%, mientras que la superficie quemada aumentaría en casi el 80% a finales del siglo XXI en los Estados Unidos de Norteamérica.

En México, el fuego se utiliza comúnmente para convertir los bosques a otros usos de la tierra. Las predicciones de cambio climático indican que los bosques se harán cada vez más vulnerables al fuego, conforme se adaptan a las nuevas circunstancias fisiológicas. Después del cambio de uso del suelo y la tala ilegal, los incendios forestales representan la tercera causa más importante de pérdida de vegetación forestal en México (Cedeño-Sánchez, 2001). Las estadísticas gubernamentales sobre incendios forestales (SEMARNAT, 2005) registran en promedio 6,774 eventos por año (1970-2005) que en aproximadamente 60% de los casos suceden en áreas con cobertura arbórea. De acuerdo a datos de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), México fue afectado en el 2007 por 5,875 incendios forestales que dañaron una superficie de 141,631 hectáreas. El 90% de la superficie afectada correspondió a pastos, arbustos y matorrales y el 10% restante a áreas con superficie arbolada. Sin embargo, el número de incendios registrados en 2007 fue el más bajo de la última década mientras que en 1998 fue el peor año con 14,445 siniestros y en el 2006 se registraron 8,745 incendios. Los Estados con mayor número de incendios en 2007 fueron el Estado de México 902, el Distrito Federal 667, Chihuahua 626, Chiapas 444, Jalisco 436, Puebla 248 y en Oaxaca 181. Los Estados con mayor cantidad de hectáreas afectadas fueron Baja California 29,685 hectáreas, Oaxaca 16,032, Jalisco 14,963, Chiapas 12,893, Guerrero 12,621, Michoacán 11,628 y Chihuahua 10,560.

Torres Rojo *et al.*, (2007) realizaron una estimación para calcular los índices de peligrosidad de incendios forestales por Estado con base en la serie histórica de incendios forestales en México de 1970 a 2005. El índice de peligro derivado de estas distribuciones permite identificar el riesgo de largo plazo de diferentes áreas geográficas. Así, combinando este índice por Estado con los pronósticos de intensificación de incendios forestales, por ejemplo, para el escenario A2 se observa un incremento en 40% del índice, mientras que para el escenario B1 se utilizó un incremento del 20%. Los resultados de los costos o beneficios derivados del cambio climático se sintetizan en el Cuadro 50 donde se encuentra que se reducen significativamente los beneficios, en comparación con los resultados encontrados en el Cuadro 48. Así, para el 2091, con el escenario A2, los beneficios se reducen a 0.008% con una tasa de descuento del 4%. De esta forma, se observa que los incendios generarán una presión adicional sobre los bosques mexicanos con los escenarios de cambio climático. Asimismo, debe destacarse que este análisis no incluye los costos del deterioro del uso del suelo.

## CUADRO 50. COSTOS TOTALES DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL CAMBIO DE USO DEL SUELO AL 2050 Y 2100 BAJO DIFERENTES ESCENARIOS (PORCENTAJE DEL PIB)

Modelo	2050			2100		
	Tasa de descuento			Tasa de descuento		
	0.5%	2%	4%	0.5%	2%	4%
B1	0.174%	0.084%	0.032%	-0.411%	-0.118%	-0.023%
A1B	0.374%	0.181%	0.070%	-0.279%	-0.080%	-0.016%
A2	0.574%	0.278%	0.107%	-0.147%	-0.042%	-0.008%

## 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. El proceso de deforestación se ha agudizado en los últimos siglos en la medida en que el hombre ha tenido mayor capacidad de penetración y transformación de las áreas naturales (Chomitz y Gray, 1996). La acelerada pérdida de la cubierta forestal trae como consecuencia la degradación de la reserva genética, la pérdida del potencial de uso de los múltiples bienes y servicios ambientales que proporcionan los ecosistemas para el bienestar humano, el calentamiento global, la alteración de ciclos hidrológicos y biogeoquímicos, la introducción de especies exóticas, el exterminio de las especies nativas y la pérdida de hábitat en general (Cairns *et al.*, 2000, Velázquez *et al.*, 2002).
2. En general se acepta que los agentes causales de deforestación de mayor impacto son los productores agrícolas y ganaderos y se reconocen que los productores forestales ejercen un menor impacto en este proceso. Conforme la frontera agrícola se hace más rentable es más probable que se registre un cambio de uso del suelo. De esta forma, los precios agrícolas inciden notablemente en el cambio del uso del suelo.
3. La matriz de transición construida con los inventarios de 1976 y 2000 para México con sus respectivas tasas de conversión, muestra que la transformación de la vegetación primaria de bosques y selvas a pastizales es la principal causa de deforestación, seguida de la transformación de cobertura arbórea a cultivo.
4. El modelo LUCC para la línea base se construyó a través de un modelo híbrido con cadenas de Markov basado en las probabilidades de transición entre un estado y otro. Tales probabilidades se pueden asumir constantes (para el escenario base) o bien variar de acuerdo a causales indirectos o inmediatos (escenarios de CC). Los resultados de la matriz de probabilidad de transición presenta la tendencia esperada en la cobertura de las categorías bosques, selvas, cultivos y pastizales inducidos, estimadas a partir de la matriz de transición.
5. Se corrigieron las matrices de probabilidad de transición de los falsos cambios que se pueden deber a: i) conversiones entre categorías no factibles (*e.g.*, cambio de bosques a selvas) que son producto de las inconsistencias entre las bases de datos, o ii) al uso de criterios diferentes para tipificar a cada una de las categorías, por ejemplo, un “bosque” abierto puede ser categorizado como “pastizal natural”, dependiendo del intérprete, o bien, una zona arbolada con algunas casas habitación puede clasificarse como zona urbana.
6. Para el caso de las proyecciones de la formación “bosques”, se observa una tendencia decreciente en todas las entidades a excepción de Campeche, donde la muy limitada superficie con bosques se reduce al inicio del periodo de proyección, pero se recupera hasta lograr en el estado estacionario una superficie muy similar a aquella con la que cuenta al inicio del periodo de proyección.

7. Con objeto de ligar las proyecciones de cambio de uso del suelo con posibles variaciones en el clima, se hicieron con modelos logísticos las probabilidades de transición como función de variables climáticas (temperatura y precipitación) y algunas otras variables de control (PIB y proporciones de las coberturas en los estados), para cada tipo de formación.
8. Para el bosque se encontró que la temperatura tiene un efecto importante; así, a mayor temperatura máxima se verifica una mayor permanencia del área forestal, esto es, un menor cambio de uso del suelo y un aumento en la precipitación reduce la probabilidad de transición. El comportamiento de estas dos variables está estrechamente ligado con el cambio de uso más frecuente del suelo con bosque, que es hacia otras coberturas, principalmente cultivos, donde se requieren terrenos que dispongan tanto de buena precipitación como temperaturas máximas no tan extremas. Por ello, en localidades arboladas de mayor temperatura y humedad se verificará una mayor conservación del suelo, sin embargo, aumenta la transición de bosque a pastizal natural. Asimismo, a mayor PIB aumenta la probabilidad de que no se cambie el uso del suelo.
9. Para el matorral existe una relación inversa entre el PIB y la probabilidad de que el matorral permanezca en esta alternativa de uso, lo que parece sugerir la presencia de una curva de degradación ambiental del tipo de Kuznets. Un aumento en la precipitación reduce la probabilidad de permanencia, esto es, fomenta el cambio de uso de matorral a otros usos. La temperatura indica que a mayor temperatura máxima menor es la probabilidad de permanencia hasta una temperatura de casi 29°C (28.78°C), a partir de la cual la probabilidad de permanencia como matorral aumenta.
10. La formación de otras coberturas está compuesta fundamentalmente por cultivos ya sea de temporal o riego. La predicción de permanencia del área con cultivos muestra que un aumento en la precipitación incrementa la probabilidad de permanencia, aunque a temperaturas extremas la probabilidad se reduce, o bien, temperaturas muy bajas con baja precipitación reducen marginalmente la permanencia. La transición de otras coberturas a bosque es muy baja; en promedio aumenta con el incremento de la precipitación pero en temperaturas extremas el efecto se reduce. Esta transición disminuye con el aumento del PIB lo que muestra que en regiones de altos niveles de ingreso, de mejor infraestructura y mayor cantidad de mercados es más difícil que se realice la transición de cultivo a otro uso (ello es válido también para el caso de selvas); por el contrario, la transición es más probable en la medida que exista una mayor proporción de bosque en el área.
11. La formación de otros tipos de vegetación está compuesta por formaciones como palmares, vegetación halófila y gipsófila y de dunas costeras. La mayor parte de la superficie en esta formación se transforma en terreno de cultivo y en menor escala en vegetación hidrófila. La transición de otros tipos de vegetación a otras coberturas es la más común. Esta transición se reduce a medida que aumenta la precipitación, lo que parece indicar que la cobertura a otros tipos de vegetación es sensible a los cambios de humedad en ambos sentidos.
12. Los pastizales inducidos y cultivados reducen su probabilidad de permanencia con temperaturas y precipitaciones extremas. Destaca que a mayor proporción de boques y selvas se reduce la permanencia de esta formación. Esta relación, al igual que en el caso del área cultivada, está determinada por la disponibilidad de infraestructura y mercados para el desarrollo de actividades productivas alternas.
13. En unidades geográficas que cuentan con más de 1% de cobertura en pastizales naturales existe una mayor transición de pastizal natural a otras coberturas (cultivos). Esta transición se incrementa en la medida que aumenta la temperatura hasta 29°C, y a partir de este nivel la probabilidad de transición se reduce. Esta dinámica está relacionada con el hecho de que a temperaturas tan altas se reduce la productividad agrícola sobre todo con escasez de agua.



14. La permanencia del área con selva muestra que un aumento en la precipitación reduce la probabilidad de transición. Esto es, fomenta el cambio de uso de selva a otros usos, principalmente otras coberturas (cultivos) y pastizales inducidos. Por el contrario, en el caso en que la proporción de selvas es mayor al 50% entonces aumenta notablemente la probabilidad de conservar las selvas. Este efecto está probablemente relacionado a la existencia de dificultades de acceso a los mercados y vías de comunicación. La transición de selva a otras coberturas depende de ambas, precipitación y temperatura. Un aumento de temperatura reduce la transformación de selvas a campos de cultivo, no obstante, en el caso en que este aumento esté acompañado de un incremento de precipitación, entonces la transformación resulta más factible; esto es, la combinación incentiva la productividad agrícola.
15. La transición que muestra la permanencia de la formación sin vegetación aparente es la única que está relacionada con factores climáticos; mayor precipitación tiende a aumentar la probabilidad de que las áreas sin vegetación se puedan poblar. Las relaciones muestran que las transiciones más comunes de áreas sin vegetación son a otros tipos de vegetación (vegetación halófila) o bien, vegetación hidrófila.
16. La probabilidad de que se conserve la vegetación hidrófila tiene relación con la temperatura máxima. Así, un aumento de esta temperatura reduce la probabilidad de conservar la vegetación hidrófila.
17. La proyección de escenarios se realizó con ayuda de las ecuaciones de predicción de probabilidades de transición. La metodología consistió en calcular los *logits* de la probabilidad de transición de cada formación a todas las otras formaciones para cada entidad federativa. Se consideraron dos escenarios de cambio climático. En términos generales la tendencia de cambio de uso del suelo motivada por factores inmediatos e indirectos continúa bajo un escenario de cambio climático. Destaca que la deforestación se reduce como resultado de que se torna relativamente menos atractivo el cambio a uso agrícola debido a que se aumenta la temperatura y se reduce la precipitación fuera del rango óptimo de desarrollo de cultivos. Sin embargo, no se considera los casos donde los ajustes de la superficie agrícola responda a incentivos de precios o a buscar mantener la producción no obstante la caída en la productividad.
18. La simulación de cambio climático al 2091 muestra escasa variación con respecto a la proyección de la línea base para algunas formaciones. Destaca que bajo cualquier escenario de cambio climático existe una menor reducción de la superficie arbolada (bosques y selvas). Ello está relacionado con el hecho de que las zonas forestales (fundamentalmente bosques dado que este efecto no es tan notorio para selvas) se distribuyen en regiones del país donde se predicen aumentos de temperatura poco drásticos, así como aumentos en precipitación, tales aumentos están en un rango donde se hace menos atractivo el cambio de uso del suelo de forestal a cultivo favoreciendo la conservación de la superficie arbolada.
19. La formación aparentemente más vulnerable ante el cambio climático por la condición extrema en la que se encuentran y por su extensión en el país, son los matorrales en zonas límites de precipitación y alta temperatura. Un cambio que acentúe más estas condiciones limitantes da por resultado una menor cobertura de esta formación que de acuerdo a las proyecciones se transforma en "otras coberturas".
20. La evaluación del costo del cambio en el uso del suelo por el cambio climático considera tres usos de las coberturas vegetales: uso maderable, captura de carbono y pérdida de inventario de carbono por cambio de uso. Para la evaluación del uso maderable se consideraron los supuestos de existencias maderables comerciales y precios de madera en pie. Para la estimación de captura de carbono se siguió la estrategia de evaluación de la aditividad. Finalmente, para la evaluación de la pérdida de carbono de los inventarios por cambio de uso y perturbación del suelo se tomaron las estimaciones de Muñoz (1994).

21. En los primeros años existe un costo alto promovido por las extensiones de matorrales que se van reduciendo y que tienen un peso significativo en el inventario de CO<sub>2</sub> que se pierde. Pero debido a que como consecuencia del cambio climático dejan de perderse menos bosque y selva al igual que manglares; ello incide en el CO<sub>2</sub> capturado y en la madera por lo que se obtienen beneficios netos. De esta forma para el 2091 se obtienen beneficios del cambio climático de 0.09% a una tasa de descuento de 4% para el escenario A2. Para el escenario B1 al 2091 los beneficios representan 0.06% con 4% de tasa de descuento. Ello excluye los costos de la degradación del suelo.
22. Los aumentos pronosticados en niveles de CO<sub>2</sub> y deforestación generan climas más secos y cálidos lo que incide en un aumento en la quema de bosques. Con el cambio climático se incrementarían dichos eventos, lo que repercutirá directamente en los bosques mexicanos. Incorporando el índice de Peligro de Incendios Forestales y los posibles impactos en dicho índice asociados a los escenarios de cambio climático se observa que los beneficios obtenidos disminuyen de manera considerable. De esta forma, para el 2091 con el escenario A2 se tienen beneficios de 0.008% descontando al 4%.
23. El escenario de cambio climático podría tener beneficios netos marginales a nivel país, dado que podría reducir los incentivos de cambio de uso del suelo en bosques, selvas y manglares con los consecuentes beneficios ambientales. Por el lado de los costos es muy probable que se pierdan grandes extensiones de matorrales, pastizales naturales y vegetación halófila que sin duda tienen un enorme valor de biodiversidad, pero comparadas con productos maderables y de servicios como la captura de carbono tienen menor impacto al compararse con los beneficios de reducir la tasa de deforestación. En este caso, la estructura de precios relativos actual probablemente no penalice esta pérdida de manera adecuada.

## RECOMENDACIONES

- a). Los efectos previstos en esta proyección muestran que es muy importante iniciar con estrategias que promuevan: i) La investigación en selección de especies resistentes a sequías que puedan adaptarse exitosamente a las formaciones de matorrales y otras coberturas, así como la definición de paquetes tecnológicos que permitan su reproducción, plantación y manejo. ii) La investigación en áreas de vegetación hidrófila para identificar estrategias de manejo que ayuden a reducir el impacto de la reducción de humedad en estas regiones. iii) Fomentar la conservación de áreas con pastizales naturales.
- b) La estimación de LUCC por efecto del cambio climático realizada muestra algunas deficiencias como: i) No integra beneficios de microclima desarrollados por algunas formaciones. ii) No considera los efectos que el aumento de temperatura y la menor precipitación podrían tener en el aumento de plagas, formación de combustibles e incremento de riesgo de incendios forestales. iii) No considera el posible efecto positivo que podrían tener la mayor concentración de algunos gases de efecto invernadero con base nitrogenada y el mismo CO<sub>2</sub> en el crecimiento de diferentes formaciones. De aquí que es necesario desarrollar estudios que permitan identificar o predecir con cierto nivel de precisión las consecuencias de tales fenómenos, evidentemente asociados a desarrollos tecnológicos que permitan mitigar sus efectos; entre estos desarrollos se pueden señalar: indicadores de riesgo de aperturas súbitas de poblaciones de plagas y enfermedades y su monitoreo; indicadores de riesgo de largo y corto plazo para orientar los presupuestos y las labores de detección y control de incendios forestales.

- c) Es innegable el efecto que tendrán las mayores temperaturas y la menor precipitación en el aumento en cantidad e intensidad de siniestros climatológicos. Por tanto resulta recomendable planear la adopción de programas agresivos de restauración ecológica para recuperar las áreas que hayan sido siniestradas por fenómenos meteorológicos o de origen antropogénico. Probablemente la creación de un fondo de recuperación de áreas naturales, similar al FONDEN reestructurado como se propone en este reporte, ayude a fondear estos costos derivados del aumento de los fenómenos meteorológicos extremos.
- d) Alinear los programas agrícolas de adaptación al cambio climático a fin de que la introducción de especies agrícolas resistentes a sequías no incentiven el cambio de uso del suelo de bosques y selvas, con lo que el efecto positivo del cambio climático podría reducirse.
- e) La actividad forestal maderera sin duda tendrá menores rendimientos como consecuencia de la reducción de precipitación y aumento de temperatura. Por ello resulta urgente iniciar una estrategia de promoción de plantaciones comerciales de turnos cortos en regiones de menor impacto derivado del cambio climático a fin de satisfacer la demanda maderera del país y reducir la dependencia de los bosques naturales. Es importante considerar que la actividad silvícola podría aumentar el riesgo de fragmentación o deterioro de los bosques, dado que éstos se encontrarán más estresados en un escenario de cambio climático.



### 3.4. BIODIVERSIDAD

#### Puntos fundamentales

La biodiversidad es un activo fundamental que contribuye al bienestar de la humanidad a través de los diversos bienes y servicios ambientales o ecosistémicos (SE) que provee; además tiene un valor intrínseco. El conjunto de estos bienes y servicios ambientales contribuyen, de diversas formas, a los procesos de producción, distribución y consumo y en este sentido tiene un valor económico incuestionable. Sin embargo, este valor no se refleja, completamente, en sus precios de mercado e incluso en muchos casos no existe un valor disponible asignado a los SE. La valoración económica de la biodiversidad, permite identificar sus posibles externalidades negativas o positivas y por tanto internalizar sus costos lo que contribuye además a una mejor asignación de los recursos escasos (Heal, *et al.*, 2003) y a preservar, de mejor manera, los ecosistemas al reconocerse su valor de mercado y a una toma de decisiones de política pública más informada (Troy y Wilson, 2006).

La influencia de las actividades humanas en los ecosistemas es relevante modificando su disponibilidad, su estructura y sus comportamientos sistémicos. En la actualidad, existen una gran cantidad de especies y ecosistemas en peligro de extinción y además se observa que la recuperación natural, sin influencia humana, de estos ecosistemas no parece una opción viable ya que la capacidad natural de adaptación o resiliencia se ha reducido notablemente en los últimas décadas (IPCC, 2007). Los impactos del cambio climático sobre la biodiversidad son, en su mayoría negativos, y tienden a intensificar las tendencias actuales a la destrucción de los ecosistemas (IPCC, 2007). Las proyecciones sobre las respuestas de la biodiversidad ante el cambio climático presentan un alto grado de incertidumbre y son imposibles de saber con precisión actualmente (Hannah *et al.*, 2002). En efecto, los procesos de adaptación de las especies al nuevo clima son muy variados y dependen de factores difíciles de predecir en la actualidad.

Los impactos del cambio climático en la biodiversidad de México están asociados al aumento de temperatura, cambios en la precipitación y eventos extremos y por la transformación en el uso del suelo. Estos cambios, por ejemplo, llevarán a incrementar los niveles de desertificación en el norte del país, incrementando la superficie afectada por sequías. Debe sin embargo reconocerse que los impactos climáticos son un factor más, aunque quizá de los más relevantes, que incide negativamente en el medio ambiente.

Los análisis de valoración económica de los servicios ecosistemas que proporciona la biodiversidad en términos de bioprospección, conservación de especies (en general) y fauna cinegética, turismo, valor estético de bosques, y captura de carbono permiten evaluar su contribución económica en precios de mercado. Asimismo se realizaron estimaciones de costos indirectos con una función de la producción del PIB agropecuario y de rendimientos de cuatro productos agrícolas y del modelo Ricardiano de la renta de la tierra. Ello muestra que existen costos asociados al cambio en biodiversidad que impactan en el valor de la producción y en la renta de la tierra.

Los costos asociados a la biodiversidad al 2100 se ubican, en el escenario A2, entre 0.06% y 0.8% del PIB con tasas de descuento del 0.5% y 4% respectivamente al 2100. Este costo es relativamente bajo de considerarse todos los servicios ecosistémicos que la biodiversidad proporciona. Asimismo, en el índice de biodiversidad potencial se observa que las pérdidas al 2100 pueden llegar a reducciones del 44.5% en el escenario extremo y del 10% en el escenario de menor aumento de temperatura lo que muestra un alto nivel de incertidumbre. Estos diferenciales entre el valor directo de mercado y su pérdida física muestra que existen problemas de valoración económica de los SE que no contribuyen a su preservación. En este sentido, las políticas de precios e incentivos económicos para la preservación de la biodiversidad deben de complementarse con regulaciones. Ello es urgente en casos donde la pérdida de *hábitat* o de especies es ya inminente.

La estimación del valor actual de la biodiversidad y por tanto de sus costos muestra que la estructura de precios actuales ofrece un subsidio fuera del mercado importante (Nordhaus y Kokkelenberg, 1999). Las consecuencias de ello son desde luego la sobreexplotación y destrucción de la biodiversidad. La conservación de la biodiversidad es sin duda una prioridad más allá de los costos o beneficios económicos. En este sentido, es necesario considerar el principio de precaución y establecer un estándar mínimo considerando la irreversibilidad de la pérdida biológica, el riesgo y la incertidumbre (Bauer, 2005). Así, es necesario evitar situaciones catastróficas (Limburg, O'Neill, Constanza, y Farber, 2002).

## 1. INTRODUCCIÓN

La biodiversidad es, sin duda, uno de los grandes activos del planeta; ello es además particularmente significativo para el caso de México que es uno de los 12 países mega diversos del mundo (CONABIO, 1998 y Mittermeir y Goettsch, 1992). Esta biodiversidad no sólo tiene un valor intrínseco sino que también contribuye al bienestar de la humanidad a través de los diversos bienes y servicios ambientales o ecosistémicos (SE) que provee. Estos servicios ambientales son aquellas condiciones y procesos naturales (incluyendo tanto a las especies como a los genes) que la sociedad puede utilizar o aprovecha indirectamente y que son asociadas a la biodiversidad. Dentro de este conjunto de servicios se pueden identificar, por ejemplo, la existencia misma de la biodiversidad y los valores estéticos y culturales, el mantenimiento de germoplasma con uso potencial para el beneficio humano, la estabilidad climática, la contribución a ciclos naturales básicos (agua, carbono y otros nutrientes) y la conservación de suelos entre otros. Estos servicios ecosistémicos son fundamentales para la preservación de todo tipo de vida y contribuyen de diversas formas y a través de distintos canales al bienestar humano y a la realización de diversas actividades económicas (Constanza, d'Arge, de Groot y Farber, 1997). Esta relevancia de la biodiversidad se reconoce crecientemente en una gran cantidad de tratados y protocolos internacionales (Pearce y Moran, 1994, Barbier *et al.*, 1994, Nunes *et al.*, 2003, Turpie *et al.*, 2003, Constanza *et al.*, 1997, Moss *et al.*, 2003) en donde resulta evidente la necesidad de preservar de la mejor manera posible a la biodiversidad para las generaciones actuales y futuras y se observa además en una creciente tendencia a asignar un valor económico a estos SE.

La evidencia disponible actualmente indica que la influencia de las actividades humanas en los ecosistemas es ciertamente relevante modificando su disponibilidad, su estructura y sus comportamientos sistémicos (Millenium Ecosystem Assessment, 2005). De este modo, en la actualidad, existen una gran cantidad de especies y ecosistemas en peligro de extinción y además se observa que la recuperación natural, sin influencia humana, de estos ecosistemas no parece una opción viable ya que la capacidad natural de adaptación o resiliencia se ha reducido notablemente en los últimas décadas (IPCC, 2007). En este contexto, se observa además que los impactos del cambio climático sobre la biodiversidad son, en su mayoría negativos, y tienden a intensificar las tendencias actuales a la destrucción de los ecosistemas (IPCC, 2007). De esta forma resulta incluso difícil identificar y aislar los efectos particulares del cambio climático sobre la biodiversidad y sugiere incluso que estos impactos pueden tener un efecto más que proporcional al sumarse al resto de los factores que ya inciden negativamente tales como la destrucción de hábitats naturales, en particular de los bosques y selvas, la sobreexplotación de los recursos naturales, la contaminación, el cambio de uso del suelo y la invasión y migración de especies a otros hábitats (IPCC, 2007).

La cuantificación de estos impactos climáticos sobre la biodiversidad en México no obstante su evidencia casuística es, sin embargo, una tarea compleja; en particular al considerar sus valores monetarios y la presencia de efectos no lineales. Esto es, el análisis, desde el punto de vista económico, de la biodiversidad y de los bienes y servicios asociados a ella, es desde luego uno de los temas más complejos y difíciles de la economía ambiental (Richmond, *et al.*, 2007). Esta cuantificación económica de la biodiversidad se basa fundamentalmente en asignarle valores económicos a los bienes y servicios ecosistémicos atendiendo a que cumplen diversas funciones económicas y que por tanto tienen un valor económico. Estas valoraciones económicas permiten obtener valores monetarios que ofrecen información relevante sobre la interacción entre los sistemas económicos y el medio ambiente, permiten estimar la evolución de capital natural e ilustrar la toma de decisiones de política pública (Nordhaus y Kokkelenberg, 1999). Sin embargo, es común que las valoraciones económicas muestren que no existe un valor económico directo y que le otorguen un valor económico pequeño a los servicios ecosistémicos (Loa *et al.*, 1996, Constanza *et al.*, 1998, Cleveland *et al.*, 1996) lo que refleja que sus beneficios económicos no son plenamente reconocidos por el mercado (De Groot, 2006). Las causas que explican que el mercado no reconozca los valores monetarios que expresen plenamente el valor ecológico son ciertamente múltiples y son intensamente discutidas en la literatura (Azqueta, 1995). Así, por ejemplo, se destaca que la biodiversidad y las funciones económicas asociadas a ella son bienes públicos donde no

puede segmentarse su uso y tiene costos de exclusión muy altos (Dasgupta *et al.*, 2000). Asimismo se considera que en muchos casos los mercados son inexistentes de forma que las funciones de la biodiversidad no son reconocidas por el mercado o existen mercados con información imperfecta o no competitivos (Boyd y Banzhaf 2007, De Groot, 2006) donde no existen derechos de propiedad claramente definidos. Ello lleva entonces a que no se consideran las externalidades positivas o negativas asociadas a la biodiversidad y se desconozcan las funciones económicas de la biodiversidad. Así, por ejemplo, se estima que persiste un desconocimiento importante de los posibles usos económicos de la diversidad biológica; esto es, existe entre 5 y 30 millones de especies (Wilson, 1988) pero sólo se conocen los usos económicos potenciales de alrededor de 500,000 (Miller *et al.*, 1985).

Las consecuencias de asignarle un valor económico inadecuado a la biodiversidad, por debajo de su valor real, conduce a que no existan incentivos económicos para un manejo sustentable de los recursos naturales (Dasgupta *et al.*, 2000). Esto es, el precio asignado a estos servicios ecosistémicos se traduce en una asignación de los recursos que debe reflejar su escasez relativa por lo que un valor bajo induce una sobreexplotación del recurso (Azqueta, 1995), su exclusión conlleva entonces a una visión incompleta de las actividades económicas y de sus principales consecuencias sobre el medio ambiente (Nordhaus y Kokkelenberg, 1999). De este modo, el principal objetivo de este capítulo es analizar los impactos del cambio climático en la biodiversidad en México desde el punto de vista económico considerando que los principales efectos se concentran en rangos de movimiento y migraciones diferenciadas de las especies, en abundancia y distribución y en fenología. Este análisis, busca reconocer los casos donde los beneficios económicos de los ecosistemas son mayores que aquellos asociados a los sistemas convertidos (Balmford *et al.*, 2002) o identificar los casos donde los comportamientos económicos racionales de corto plazo son ineficientes económicamente y representen una erosión de los recursos naturales que resulta inaceptable en el largo plazo (Nordhaus y Kokkelenberg, 1999).

## 2. MARCO GENERAL PARA EL ANÁLISIS DE LA BIODIVERSIDAD

Los impactos esperados del cambio climático sobre la biodiversidad para las próximas décadas son impresionantes y tendrán consecuencias que ponen incluso en riesgo su preservación a nivel global. De hecho se estima (IPCC, 2007) que la resiliencia de una cantidad significativa de los ecosistemas será excedida para el 2100 y que entre el 20% o el 30% de las especies se encuentran en peligro de extinción en el caso en que el aumento de temperatura sobrepase los 2 o 3°C (IPCC, 2007). La biodiversidad, en una forma general<sup>34</sup> puede entenderse como la suma o variabilidad o diversidad de especies, ecosistemas y diversidad genética en el mundo (Hannah, *et al.*, 2002a y Nuñez, 2001). Esta biodiversidad proporciona diversos bienes y servicios que contribuyen al bienestar humano ya sea directamente o indirectamente a través de apoyar diversos procesos económicos (Havstad *et al.*, 2007). En particular, a este conjunto de servicios se les define como los servicios ecosistémicos donde se incluye a aquellos beneficios que proporcionan los sistemas ecológicos a los hogares, comunidades y a las economías (Millenium Ecosystem Assessment, 2005 y Daily, 1997). En principio estos servicios ecosistémicos se pueden clasificar (Millenium Ecosystem Assessment 2005) como:

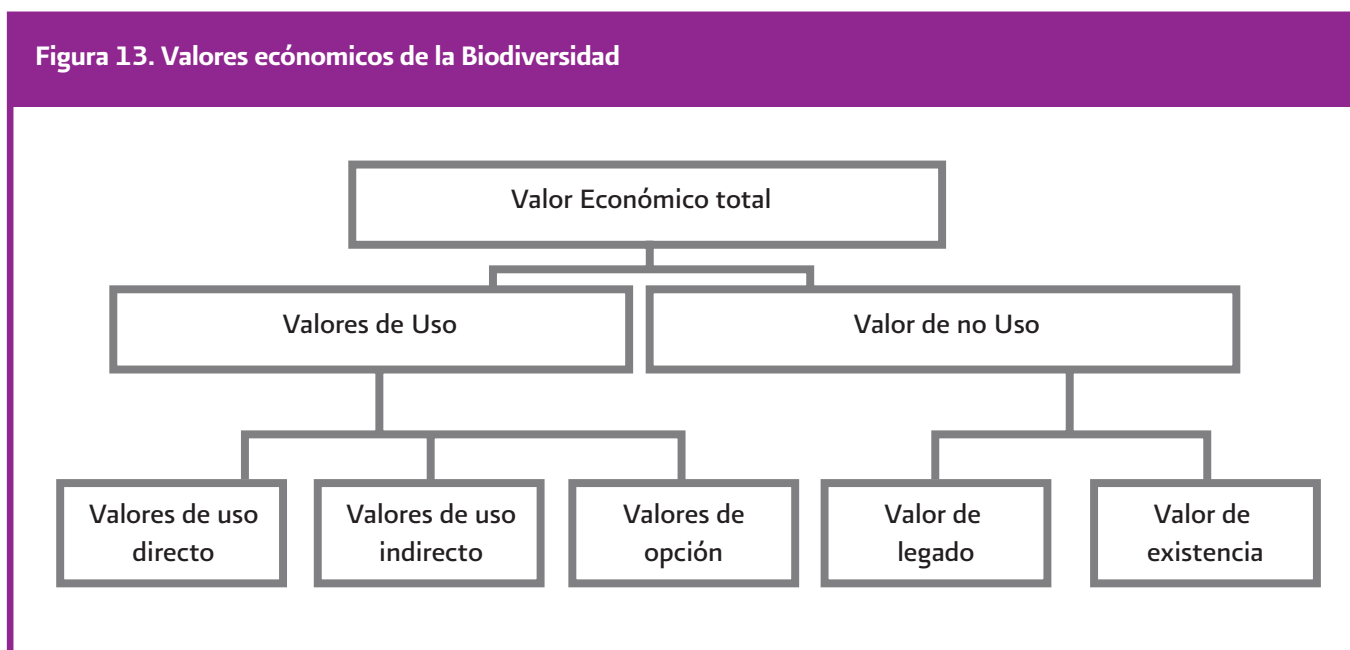
1. Servicios de provisión: son los productos que se obtienen de los ecosistemas, incluyen: alimentos y fibras, combustibles, recursos genéticos, bioquímicos, medicinas naturales y farmacéuticos, recursos ornamentales, y agua.

<sup>34</sup> La biodiversidad o diversidad biológica se define como “la variabilidad entre los organismos vivientes de todas las fuentes, incluyendo, entre otros, los organismos terrestres, marinos y de otros ecosistemas acuáticos, así como los complejos ecológicos de los que forman parte; esto incluye diversidad dentro de las especies, entre especies y de ecosistemas” (UNEP, 1992).

2. **Servicios de Regulación:** son los beneficios que se obtienen de los procesos de regulación de los ecosistemas, incluyen: mantenimiento de la calidad del aire, regulación del clima, regulación del agua, control de la erosión, purificación del agua y mantenimiento de desechos, regulación de enfermedades humanas, control biológico, polinización, y protección de tormentas.
3. **Servicios culturales:** son los beneficios no materiales que las personas obtienen de los ecosistemas a través del enriquecimiento espiritual, el desarrollo cognitivo, reflexión, creación y experiencias estéticas, incluye: diversidad cultural, recreación y ecoturismo.
4. **Servicio de Soporte:** son aquellos necesarios para la producción de todos los demás servicios ecosistémicos, como formación del suelo, ciclo de nutrientes y producción primaria.

El conjunto de estos bienes y servicios ambientales contribuyen, de diversas formas, a los procesos de producción, distribución y consumo y en este sentido tiene un valor económico incuestionable (Cuadros 51 y 52). Estos servicios son ciertamente múltiples e incluyen aspectos tan diversos como protección y conservación de la biodiversidad, del suelo y del agua, turismo y recreación, secuestro de carbono e incluso la biodiversidad aporta conocimientos y servicios adicionales que permite, por ejemplo, elevar la productividad agropecuaria y ofrecer nuevas alternativas médicas (Heal, 2000, Gret-Regamey *et al.*, 2007, Guo, Xiao Gon Sheng, 2001, Gret-Regamey y Katia, 2007, Bodes *et al.*, 1984, Birsdsey y Health, 1995, Bruce *et al.*, 1999). Sin embargo, este valor no se refleja, completamente, en sus precios de mercado e incluso en muchos casos no existe un valor disponible asignado a los SE. Estas funciones económicas permiten entonces asignar un valor<sup>35</sup> o precio a estos servicios ecosistémicos (Troy y Wilson, 2006). La estimación monetaria de estos valores puede realizarse atendiendo a diversas formas de valoración<sup>36</sup> (De Groot, 2006 y Troy y Wilson, 2006) donde no existe un valor único que puede asociarse a estas funciones y en todo caso debe considerarse un rango de valores monetarios que reflejen al menos los valores de uso directos e indirectos, de existencia y de opción de la biodiversidad (Krutilla, 1967) (Figura 13).

**Figura 13. Valores económicos de la Biodiversidad**



<sup>35</sup> Existen desde luego críticas éticas y a las limitaciones de este tipo de valuaciones (véase por ejemplo Chee 2004, Ludwig, 2000, Martín-López y Benayas, 2008).

<sup>36</sup> Existen desde luego otros tipos de valuaciones tales como aquellas referidas a valuaciones grupales.



## CUADRO 51. RELACIÓN ENTRE FUNCIONES DEL ECOSISTEMA, PROMEDIO DE VALORES Y TÉCNICAS DE VALUACIÓN MONETARIA

Funciones del ecosistema ( bienes y servicios asociados )	Rango de valores monetarios en dls por ha <sup>a</sup>	Precio directo de mercado <sup>b</sup>	Precio indirecto de mercado						Valuación contingente	Valuación grupal
			Costos evadidos	Costo de reemplaza- miento	Factor ingreso	Costo de transporte	Precio Hedónico			
<i>Funciones de regulación</i>										
1. Regulación del gas	7 - 265		***	0	0				0	0
2. Regulación del clima	88 - 223		***	0	0				0	0
3. Regulación de disturbios	2 - 7,240		***	**	0			0	*	0
4. Regulación del agua	2 - 5,445	*	**	0	***			0	0	0
5. Abastecimiento de agua	3 - 7,600	***	0	**	0	0		0	0	0
6. Retención del suelo	29 - 245		***	**	0			0	0	0
7. Formación del suelo	1 - 10		***	0	0			0	0	0
8. Regulación de nutrientes	87- 21,100		0	***	0			0	0	0
9. Tratamiento de desperdicios	58 - 6,696		0	***	0			0	**	0
10. Polinización	14 - 25	0	*	***	**			0	0	0
11. Control biológico	2 - 78	*	0	***	**			0	0	0
<i>Funciones de hábitat</i>										
12. Función de refugio	3 -1,523	***	0	0	0			0	**	0
13. Función de vivero	142 - 195	***	0	0	0			0	0	0
<i>Funciones de producción</i>										
14. Alimentos	6 - 2,761	***	0	**				*	0	0
15. Materia prima	6 - 1,014	***	0	**				*	0	0
16. Recursos genéticos	6 - 112	***	0	**				0	0	0
17. Recursos medicinales		***	0	**				0	0	0
18. Recursos ornamentales	3 - 145	***		**				0	0	0
<i>Funciones de información</i>										
19. Información estética	7 - 1,760		0		0			***	0	0
20. Recreación y turismo	2 - 6,000	***	0	**	**			***	0	0
21. Insp. cultural y artística		0		0	0			***	0	0
22. Inf. espiritual e histórica	1 - 25			0	0			***	0	0
23. Ciencia y educación		***		0	0			0	0	0

(a) Los valores en dólares están basados en Constanza et al. (1998) y aplican en diferentes ecosistemas. En las columnas el método más utilizado está marcado con \*\*\*, el segundo más usado con \*\*, etcétera; los círculos abiertos indican que ese método no fue usado en el estudio de Constanza pero puede ser usado potencialmente a esa función. (b) Basado únicamente en el valor agregado (precios de mercado menos costos de capital y trabajo).

**CUADRO 52. RESUMEN DE LOS VALORES GLOBALES ANUALES DE LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS  
(DÓLARES DE 1994 POR HECTÁREA POR AÑO)**

Bioma	Área (ha x 10 <sup>6</sup> )	Regulación de gas	Regulación de clima	Regulación de perturbaciones	Regulación de agua	Oferta o suministro de agua	Control de erosión	Formación de suelo	Ciclo de nutrientes	Tratamiento de residuos	Polinización	Control biológico	Hábitat /refugio	Producción de alimentos	Materias primas	Recursos genéticos	Recreación	Cultural	Valor total por ha	Valor total, flujo mundial	
MARINO	36,302																		577	20,949	
Océano abierto	33,200	38							118			5		15	0				252	8,381	
Costas	3,102			88					3,677			38	8	93	4			82	62	4,052	12,568
Estuarios	180			567					21,100			78	131	521	25			381	29	22,832	4,110
Algas marinas	200								19,002					2					19,004	3,801	
Arrecifes de coral	62			.750						58		5	7	220	27		3,008	1	6,075	375	
Plataforma	2,660								1,431			39		68	2				70	1,610	4,283
TERRESTRE	15,323																			804	12,319
Forestal	4,855		141	2	2	3	96	10	361	87		2		43	138	16	66	2	969	4,706	
Tropical	1,900		283	5	6	8	245	10	922	87				32	315	41	112	2	2,007	3,813	
Templado /boreal	2,955		88		0					87		4		50	25		36	2	302	894	
Pastizales	3,898	7	0		3		29			87	25	23		67		0	2		232	906	
Humedales	330	133		4,539	15	3,800				4,177			304	256	106		574	881	14,785	4,879	
Marismas de manglar	165			1,839						6,696			169	466	162		658		9,990	1,648	
Pantanos	165	265		7,240	30	7,600				1,659			439	47	49		491	1,761	19,580	3,231	
Lagos / ríos	200				5,445	2,117				665				41			230		8,498	1,700	
Desierto	1,925																				
Tundra	743																				
Hielo /roca	1,640																				
Tierras de cultivo	1,400										14	24		54						92	128
Urbano	332																				
Total	51,625	1,341	648	1,779	1,115	1,692	576	53	17,075	2,277	117	417	124	1,386	721	79	815	3,015		33,268	

Fuente: Constanza et al., (1998)

Esta valuación económica tiene varias ventajas para la misma biodiversidad. Esto es, la valoración de los SE, incluyendo sus costos y beneficios económicos más importantes, permite identificar sus posibles externalidades negativas o positivas y por tanto internalizar sus costos lo que contribuye a una mejor asignación de los recursos escasos (Heal et al., 2003) y, además, contribuye a preservar, de mejor manera, los ecosistemas al reconocerse su valor de mercado y a una toma de decisiones de política pública más informada (Troy y Wilson, 2006). Asimismo facilita entender a los ecosistemas como activos de capital que tiene un valor económico (Daily, 2000). Desde luego, este tipo de valoración de los SE presenta diversas dificultades. Por ejemplo, existen serios problemas para estimar el valor real aproximado de estos servicios atendiendo a que las funciones de los ecosistemas y sus beneficios asociados son escasamente entendidos; asimismo este tipo de valoración presenta sesgos culturales o psicológicos y de consistencia económica y existen serias dificultades para incluir aspectos culturales, filosóficos o incluso psicológicos y para estimar adecuadamente los valores ecológicos reales (Spash et al., 2006 y Straton, 2006). Además, existen incluso críticas éticas para este tipo de valoraciones (véase por ejemplo Chee 2004 y Ludwig, 2000, y Martin-López y Benayas, 2008).

La investigación científica reciente (e.g., Lovejoy y Hannah 2005 e IPCC, 2007) sobre los impactos del cambio climático sobre la biodiversidad son ciertamente impresionantes. No obstante ello, debe reconocerse que la evaluación de los impactos esperados es un proceso complejo en donde persisten niveles de incertidumbre importantes. Asimismo, se debe considerar que los eventos climáticos extremos tienen también impactos importantes en la biodiversidad ya sea a través de incendios, huracanes o cambios extremos de temperatura.

Así, la evidencia histórica muestra la presencia de fósiles de animales de climas de latitudes más cálidas en las zonas cercanas al polo (Huntley, 1983) y se reconoce que los cambios climáticos han impactado de manera significativa a la biodiversidad induciendo incluso cambios biológicos que incluyen la extinción de especies y plantas (Overpeck et al., 2006, IPCC, 2007 y Markgraf, et al., 1996). Se estima, por ejemplo, una pérdida de una quinta parte de los moluscos marinos y de dos terceras partes de las especies de coral debido a oscilaciones de 5 grados de temperatura (Jackson, 1995) o por ejemplo la desaparición de una especie emblemática como el mamut (Lister y Bahn, 1995). Asimismo, existe evidencia de extinciones de mamíferos y otros tipos de animales y vegetación en América (Markgraf, et al., 1996) y de los fríos extremos que causaron la destrucción de bosques entre 1696 y 1701 en los Alpes (Luckman, 1994, Bugmann y Pfister, 2000).

El análisis de los impactos del cambio climático sobre la biodiversidad dispone actualmente de una sólida evidencia empírica e incluye tanto estudios de especies de forma individual (de Jong, et al., 1998, Rodríguez-Trelles y Rodríguez, 1998, Thomas et al., 2001) como de especies múltiples considerando la necesidad de mantener cierta sincronía entre diferentes especies de vegetación o fauna (Pounds et al., 1999, Hoegh-Guldberg, 1999 y Nuñez, et al., 2001). Estos estudios muestran que aproximadamente el 40% de las especies responden directamente a los impactos del cambio climático (Parmesan y Yohe, 2003). Esta cifra puede ser incluso mayor considerando las interacciones entre diferentes tipos de especies y que en todo caso aquellas especies que no responden aun directamente al cambio climático puede deberse a que sus respuestas no son captadas, que tienen un límite climático más elevado o a que disponen de un proceso de adaptación importante (Grabherr et al., 1994 Parmesan, et al., 1999).

Desde luego, la valuación completa de este conjunto de funciones está más allá de las posibilidades de este estudio. Esto es, existen diversas metodologías de valoración monetaria para diferentes servicios ecosistémicos que van desde valores de mercados directos, indirectos y valoración contingente y grupal. Este tipo de valoración, incluyen una gran diversidad de aspectos pero aun presentan diversos problemas. Así, en todo caso, en este estudio el análisis se concentra exclusivamente en el mantenimiento de germoplasma con uso potencial para el beneficio humano, en la captura de carbono, y en los valores estéticos y de recreación.

### 3. LOS IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA BIODIVERSIDAD

Los impactos actuales y/o esperados del cambio climático sobre la biodiversidad en las próximas décadas son ciertamente significativos e incluyen cambios en el tamaño y distribución de las poblaciones, cambios de rango, cambios de la fenología<sup>37</sup>, de evolución e incluso de extinción, modificaciones en número, en cambios en los ritmos y tiempos de los ciclos tanto reproductivos como en las cosechas que incluye el florecimiento o la emergencia de los insectos y en distintos procesos de adaptación y migraciones de especies que al realizarse con distintos ritmos e intensidades ocasionan un desacoplamiento en las interacciones ya establecidas de las especies y que obviamente se acentúa en la interacción entre la flora y la fauna (IPCC, 2007).

En la actualidad, se dispone de una gran cantidad de evidencia sobre los impactos, mayoritariamente negativos del cambio climático sobre la biodiversidad (Hughes, 2000 y Root et al., 2003 y Lovejoy y Hannah, 2005). Estos estudios, sobre los impactos del cambio climático en la biodiversidad incluyen diversos tipos de análisis correlacionales<sup>38</sup> y experimentales o analógicos (IPCC, 2007 y Parmesan, 2006) y permiten identificar la tolerancia a climas de especies específicas y la observación directa de los impactos (Hannah, et al., 2002a). Así, la biodiversidad es y ha sido continuamente afectada por el clima que incide sobre el tamaño reproducción y sobrevivencia de las especies y sus respuestas evolutivas y formas de dispersión (Hannah y Lovejoy, 2005). Sin embargo, los impactos actuales y aquellos esperados en los próximos 100 años tenderán a aumentar y en buena medida resultan aun impredecibles. Ello atendiendo a que el ritmo e intensidad de estos cambios climáticos serán mayores y se saldrán de los rangos naturales conocidos (Bush, 2004 y Overpeck, et al., 2006). Asimismo, estos cambios climáticos se acentuarán como consecuencia de la acción humana y de la intrusión de especies invasoras, de contaminación de ríos y manantiales, e incluso por la explotación de especies debido a la caza o la pesca. La evidencia disponible actual sugiere entonces impactos relevantes en los ecosistemas (Cuadro 53).

<sup>37</sup> La fenología es la correspondencia en el tiempo de las actividades estacionales de los animales y plantas (IPCC, 2007).

<sup>38</sup> Los estudios correlaciones han sido criticados en la medida en que no capturan los proceso de interacción pero representan una aproximación inicial (Peason y Dawson, 2003 y Pearson, 2006 IPCC, 2007).

## CUADRO 53. IMPACTOS NEGATIVOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS ECOSISTEMAS

Aumento de la temperatura sobre la era pre-industrial	Efecto en los ecosistemas
0.5 – 1.5 °C	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mayor extinción de anfibios en las montañas</li> <li>• Incremento del blanqueamiento en la barrera coralina</li> <li>• Mayores daño en los ecosistemas polares</li> <li>• Pérdida el 8% en hábitat de peces de agua dulce en Norteamérica</li> </ul>
1.5 – 2.5°C	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Del 9 al 31 % de las especies se compromete a la extinción</li> <li>• Todas las barreras coralinas se blanquean</li> <li>• Pérdida del 47% de la selva en Queensland</li> <li>• Pérdida del 41 al 51 % de <i>fynbos</i>, y del 13 al 80% de diferente fauna en Sudáfrica</li> <li>• Grande pérdida de la selva del Amazonas y de su biodiversidad</li> </ul>
2.5 – 3.5 °C	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se transforma el 16% de los ecosistemas globales</li> <li>• Alto riesgo de extinción del oso polar</li> <li>• Riesgo de que la biósfera terrestre sea fuente neta de carbono</li> <li>• 50 % de pérdida de tundra</li> <li>• Globalmente del 21 al 52% de las especies se compromete a la extinción</li> <li>• Los corales se extinguen</li> <li>• Los arrecifes tienen grandes cantidades de algas</li> </ul>
3.5 – 4.5 °C	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se predice una extinción global del 14 al 40 % de las especies endémicas en puntos calientes de biodiversidad</li> <li>• Pocos ecosistemas se pueden adaptar</li> <li>• 50 % de las reservas naturales no pueden cumplir sus objetivos</li> <li>• Extinción de 200 a 300 especies de plantas alpinas en Nueva Zelanda</li> <li>• A más de 4 °C extinciones masivas en todo el mundo</li> </ul>

Fuente: Elaboración propia con datos del IPCC (2007)

1. Los impactos del cambio climático sobre la biodiversidad son múltiples<sup>39</sup> y muy diversos, además muestran distintos ritmos por especies de flora y fauna lo que puede intensificar sus impactos finales al desacoplar los procesos de interrelación actual e intensificar la pérdida de especies ante las dificultades de las migraciones que se enfrentan a barreras artificiales. Las simulaciones realizadas con diversos modelos de distribución de especies, considerando migración y adaptación, muestran que las desapariciones de especies es improbable que sean resultado de una vulnerabilidad demográfica (Davis *et al.*, 1998) y por tanto debe atribuirse al efecto combinado de interacciones humanas donde el cambio climático tiene un papel importante. Los impactos climáticos son además diferenciados por latitudes no sólo por las diferentes intensidades en el aumento del clima sino también porque la biodiversidad responde de manera diversa a las diferentes fenómenos climáticos. Esto es, la fenología de las plantas es más notoria en latitudes del norte donde el aumento de la temperatura es más intensa y las respuestas de la biodiversidad se asocian más directamente a la temperatura (Prince *et al.*, 1998 y Inouye *et al.*, 2002). Por el contrario, se observa que en los trópicos los impactos del cambio climático están más influidos por los patrones de lluvia (Reich, 1995) en la medida en que los períodos de sequía impactan negativamente a la flora y reducen, por tanto, el número de herbívoros (Carletty, 1998). De hecho, se observa que existe una correlación negativa entre períodos de sequía y reducción de la biodiversidad (Busch, 2004 y Peterson *et al.*, 2002b).

<sup>39</sup> Existen incluso estudios sobre los impactos en la evolución de las especies como consecuencia del cambio climático (IPCC, 2007, Thomas, 2005, Bradsahw y Holzapfel, 2006).

Es necesario además considerar que los eventos extremos afectan la distribución de especies y sus comportamientos y dinámica incluso en mayor medida que la temperatura o los patrones de precipitación (Easterling *et al.*, 200b, Inouye, 2000, Parmesan *et al.*, 2000 y Otterson *et al.*, 2001). De este modo, se observa que algunas de las áreas con mayor riesgo de impactos en biodiversidad se ubican en los trópicos y en latitudes elevadas al existir escasas opciones de adaptación. Por ejemplo, en general, en regiones tropicales no existe forma de migrar buscando otra temperatura y sólo sobre los 3,000 metros existe hielo. De este modo, las vegetaciones de latitudes bajas no pueden moverse a otros climas (Busch, 2002b). Ello además se acentúa en áreas donde existen micro-climas específicos o nichos de biodiversidad donde la posibilidad de migración es muy limitada. Este problema se presenta también para zonas desérticas donde las sequías pueden ser muy importantes y las migraciones son difíciles ya que la flora y fauna están acopladas a ciertos nichos climáticos (Busch, 2002b y Markgraf, *et al.*, 1995). Además las actividades humanas han transformado en áreas aisladas las mayores zonas de biodiversidad (*hot - spots*).

2. Los impactos del cambio climático sobre la composición vegetal sugieren que en general puede esperarse un aumento de los bosques en regiones de sabana y en latitudes del norte como consecuencia del aumento del CO<sub>2</sub> y la temperatura (Drake, *et al.*, 1997). Así, la tendencia general es que la vegetación verde se expanda hacia los polos y las selvas se conviertan en sabanas; simultáneamente, se espera un aumento de los bosques con coberturas de hojas y en la floración (Beaubien y Freeland, 2000 y Kai, *et al.*, 1996). Sin embargo, estos impactos dependen también de la disponibilidad de agua ya que al estimarse una reducción de la provisión del líquido para el 2100 es posible que se observe también una reducción del área de bosques y de biomasa (Betts, *et al.*, 2004). De este modo los impactos del aumento del CO<sub>2</sub> son específicos (Murray *et al.*, 1998 y Ward y Stain, 1999) ya que por ejemplo las plantas pueden ajustar reduciendo su tamaño dependiendo del nivel de agua disponible (Busch, 2002b).
3. Los impactos del cambio climático influyen también en la modificación de los ciclos de la vegetación. Así, el proceso de vegetación verde inicia antes y la salida del otoño se hace tardía lo que implica estaciones verdes más largas (Schwartz, 1998).
4. Los impactos climáticos indican un proceso de retroalimentación donde los bosques no podrán mantener indefinidamente su capacidad de almacenamiento de carbono. Por ejemplo, para México se espera una pérdida de capacidad de almacenamiento de entre 1 y 20% con cambios en las hojas de los árboles (Cox *et al.*, 2001). Por ejemplo, se estima que la capacidad de los bosques de secuestro de carbono empiece a reducirse a partir del 2030 (IPCC, 2007).
5. Los impactos climáticos implica también cambios en los patrones de los ciclos de vida de los insectos (Sparks y Yates, 1997). Así, con el cambio climático, los insectos crecen más rápido y tienen períodos más cortos de gestación y desarrollan procesos de migración más intensa (Taylor, 1981, Bryant, Thomas *et al.*, 1997 y 2002, Heikinheimo *et al.*, 1997, Ayres *et al.*, 2000, Peñuelas *et al.*, 2001 y Bale *et al.*, 2002). Estas modificaciones en los patrones de los insectos tienen consecuencias adicionales posteriores sobre el conjunto de la biodiversidad ya que se rompen las cadenas reproductivas y alimenticias. Asimismo, debe considerarse que los insectos pueden ocasionar daños importantes incluso superiores que los incendios en los bosques (Logan *et al.*, 2003, IPCC, 2007). Además, se altera la distribución de las especies como consecuencia de los cambios en los patrones reproductivos, como por ejemplo en el caso de las mariposas (Davies *et al.*, 2006, IPCC, 2007).

6. En respuesta al reciente calentamiento global se han presentados cambios de eventos fenológicos como desarrollo de las hojas, floración, maduración de las frutas, coloración de hojas, caída de hojas de plantas, migración de aves, canto de anfibios, la aparición y aparición de las mariposas (IPCC, 2007). A pesar de que los estudios fenológicos difieren en metodología aplicada, especies, regiones y eventos estudiados, la información muestra una clara extensión de la estación de crecimiento impulsada por la temperatura por hasta dos semanas en la segunda mitad del siglo XX en altas y medias latitudes septentrionales (Cuadro 54), principalmente por una primavera temprana, pero también por un otoño tardío.

#### CUADRO 54. CAMBIOS EN LA DURACIÓN DE LA ESTACIÓN DE CRECIMIENTO DE ALGUNAS ESPECIES DE PLANTAS

Lugar	Periodo	Especies/Indicador	Prolongación (días por década)	Referencias
Alemania	1951 - 2000	3 árboles caducifolios (D/Co)	1.1 a 2.3	Menzel et. al., 2001 Menzel, 2003
Suiza	1951 - 1998	9 fases de primavera 6 fases de otoño	2.7*	Defila y Clot, 2001
Europa(jardines fenológicos)	1959 - 1996	Varias fases de primavera y otoño (D a Co, y Ca)	3.5	Menzel y Fabián, 1999 Menzel, 2000 Chmielewski y Rotzer, 2001
Japón	1969 - 1998	Ginko Biloba (D/Ca)	2.6	Matsumoto et al, 2003
Hemisferio Norte	1953 - 2000	Estación de crecimiento normalizado por el índice de diferencia de vegetación	0.7 a 1	Zhou et al. 2001

Notas: Desarrollo de Hojas (D), Coloración de Hojas (Co), Caída de Hojas (Ca), \* indica sólo la media de las tendencias significantes

Fuente: IPCC, 2007

7. Cambios en la distribución de especies han ocurrido en un amplio rango de grupos taxonómicos y regiones durante el siglo XX (Cuadro 55). De esta forma, se observa que especies de mariposas, garrapatas y libélulas emigraron hacia el norte en países Europeos (Lindgren et al., 2000, Daniel et al., 2003, Hill et al., 2001, Franco et al., 2006, Wilson et al., 2005, Konvicka et al., 2003). La vegetación presenta también cambios en altitudes en diferentes países de Europa, Senegal y Estados Unidos de Norteamérica. El cambio climático implica modificaciones en los ciclos de vida y reproductivos de las mariposas acompañado de migraciones más largas y modificación de sus hábitats naturales (Parmesan, 2005). Los estudios experimentales muestran que existe una dependencia lineal entre el desarrollo del cuerpo y la temperatura y entre la intensidad de la migración y los hábitos reproductivos lo que implica entonces cambios en su tamaño y número.

## CUADRO 55. EVIDENCIA DE CAMBIOS SIGNIFICATIVOS RECIENTES HACIA LOS POLOS Y A ELEVACIONES MAYORES

Lugar	Especie/Indicador	Cambios de rangos observados debido a aumentos de temperatura	Referencias
Costa de California E.U.A.	Cigarras y Garrapatas ( <i>Ixodes ricinus</i> )	Cambio de Rango hacia el norte	Karban y Strauss, 2004
Suiza República Checa	Garrapata ( <i>Ixodes ricinus</i> )	Expansión hacia el norte de 1982-1996 Ampliación a mayores altitudes (+300 m)	Lindgren <i>et al.</i> , 2000, Daniel <i>et al.</i> , 2003
Washington, E.U.A	Mariposa patrón	Rango de expansión con un aumento de T min	Crozier, 2004
Reino Unido	329 especies en 16 taxos	Hacia el norte (prom. 31-60 km) y al alza (+25 m) en 25 años. Significancia en los cambios de elevación en 12 de 16 taxones hacia el norte. Sólo 3 especies de anfibios y reptiles cambiaron significativamente hacia el sur y a elevaciones más bajas.	Hickling <i>et al.</i> , 2006
Reino Unido	Mariposa de muro ( <i>Pararge aegeria</i> )	Ampliación del margen norte, a 0.51-0.93 km / año, dependiendo de la disponibilidad de hábitat	Hill <i>et al.</i> , 2001
Reino Unido	4 mariposas del norte (1970-2004)	2 especies retirándose entre 73 y 80 km al norte, 1 especie desplazándose 149 m hacia arriba.	Franco <i>et al.</i> , 2006
España central	16 especies de mariposas	Cambio cuesta arriba de 210 m en la parte baja del límite altitudinal entre 1967-73 y 2004	Wilson <i>et al.</i> , 2005
Reino Unido	Libélulas y 37 especies de caballito del diablo	36 de 37 especies emigraron hacia el norte (media de 84 km) de 1960-70 a 1985-95	Hickling <i>et al.</i> , 2005
República Checa	15 de 120 especies de mariposas	Cambios cuesta arriba en los últimos 40 años	Konvicka <i>et al.</i> , 2003
Polonia	Cigüeña blanca ( <i>Ciconia</i> )	Expansión del Rango de altura en 240 m en los últimos 70 años.	Tryjanowski <i>et al.</i> , 2005
Australia	3 Marsupiales, jabalíes y 4 especies de mamíferos	Ampliaciones de Rango a mayores altitudes	Green y Pickering, 2002
Australia	Murciélagos Frugívoros o Zorros voladores	Contracción de la frontera sur de los polos de 750 km desde 1930	Tidemann <i>et al.</i> , 1999
Senegal, Este de África	126 especies de árboles y arbustos (1945-1993)	Cambio latitudinal de hasta 600 m / año en zonas ecológicas debido a la disminución de las precipitaciones.	González, 2001
Rusia, Bulgaria, Suiza, España, Nueva Zelanda, E.U.A	Árbol de línea	Adelanto hacia mayores altitudes	Meshinev <i>et al.</i> , 2000; Kullman 2002; Peñuelas y Boada, 2003; Millar y Herdman, 2004
Canadá	Bioclimático, tundra	Desplazamiento hacia el norte de 12 km /año	Fillol y Royer, 2003
Alaska	Vegetación arbustiva del Ártico	Expansión de arbustos anteriormente en zonas libres.	Sturm <i>et al.</i> , 2001
Alpes europeos	Vegetación de la Cumbre alpina	Cambio de elevación, una mayor riqueza de especies en las cima de las montañas.	Grabherr <i>et al.</i> , 2001; Pauli <i>et al.</i> , 2001; Walther <i>et al.</i> , 2005 <sup>a</sup>
Montana, E.U.A	Especies del Ártico - Alpes	Disminución en el margen meridional del rango.	Lesica y McCune, 2004
Alemania, Escandinavia	Acebo inglés ( <i>Ilex aquifolium</i> )	Desplazamiento del margen del polo norte debido al aumento de las temperaturas invernales.	Walther <i>et al.</i> , 2005b

Fuente: IPCC, 2007



### Diversidad genética de la mariposa en Europa

El meta-análisis de la diversidad genética de la mariposa en Europa (Schmidt y Hewitt, 2004), muestra que debido al cambio en el uso del suelo y por el cambio climático se han generado cambios en la diversidad genética de las mariposas, los cuales responden a la adaptabilidad ambiental de las especies. La información que emplearon para el estudio se basa en información filogeográfica, patrones actuales de distribución, corología, biogeografía clásica y tendencias demográficas y de Libros Rojos de Datos. El grupo de control está compuesto de ocho especies de mariposas ampliamente distribuidas por toda Europa con centros de distribución en Europa Central.

Los resultados muestran que las mariposas de origen mediterráneo (Azul) están en menor peligro en el sur de su distribución (en las áreas iniciales) y más en peligro hacia el norte, lo cual puede ser como resultado del empobrecimiento genético que tiene lugar comúnmente en el rango de expansión postglacial (Hewitt, 1996, Comes y Kadereit, 1998). Los patrones genéticos de las mariposas anilladas disminuyen fuertemente en Europa oeste en comparación al este, y no muestran diferencias en especies en la comparación norte-sur. Finalmente las mariposas blancas no muestran patrones de decrecimiento en ninguna de las áreas comparadas.

#### CUADRO R1. PROMEDIOS DE LAS TENDENCIAS DEMOGRÁFICAS DE LAS POBLACIONES DE MARIPOSA EN EUROPA

Tipo	Todos	P	Sur	Norte	P	Oeste	Este	P
Azul	-19.8±9.0	0.013	-11.5±7.1	-35.7±19.5	0.001	-24.6±14.1	-17.9±10.2	0.227
Anillada	-28.5±12.9	0.013	-31.4±12.2	-26.7±15.1	0.506	-44.1±19.4	-18.8±15.6	0.012
Blanco	+0.2±3.9	0.999	+2.2±4.4	-1.1±4.3	0.178	-0.4±6.5	+6±2.7	0.719
Control	-9.0±8.5	0.289	-10.4±8.7	-7.7±9.2	0.564	-12.6±11.7	-6.4±7.3	0.220

Notas: medias de las tendencias demográficas de la población (van Swaay & Warren 1999), en toda Europa, este vs oeste y norte vs sur. Todos los valores indican la tendencia de los cambios en la distribución en por ciento ( $\pm$  SD) a lo largo de los últimos 25 años. La tendencia general europea (todos) es la prueba del diferente significado entre la estabilidad de las pruebas aplicadas de los respectivos cambios en la distribución de estabilidad (por ejemplo 100%). Diferencias entre occidentales y orientales, así como del norte y del sur se ponen a prueba con prueba t en pares.

Fuente: Schmidt y Hewitt, 2004

8. El cambio climático se traduce también en importantes migraciones de pájaros hacia diversas zonas fuera de sus hábitats tradicionales (Thompson *et al.*, 1986, Ludidchowski, 1997, Brown *et al.*, 1999). Estas migraciones se traducen en una pérdida importante de especies al romperse las cadenas alimenticias (Malcom *et al.*, 2002).
9. El aumento de temperatura llevará a los límites climáticos a diversas especies. Así, en el hemisferio norte se espera que las especies de altitudes altas disminuyan como consecuencia del mayor impacto en el aumento de las temperaturas. Ello pondrá en peligro de extinción a la biomasa asociada a la tundra y a los desiertos polares y sistemas montañosos e implica posiblemente la extinción de vertebrados árticos (osos polares) y algunas especies de mar (Huntley, 2005). Esta morbilidad de especies en el norte reduce la variabilidad biológica, así como la resiliencia del sistema y las propiedades de funcionamiento sistémico (Dasgupta y Maler, 1997). Los resultados de un metanálisis de los cambios en la distribución y fenología de diversas especies en todo el mundo durante los pasados 20 a 140 años debidos al cambio climático se presentan en el Cuadro 56. Este análisis indica que más de la mitad de las especies exhiben cambios significativos en su fenología y en la distribución. Los cambios no son aleatorios, sino responden sistemáticamente en la dirección esperada a cambios regionales en el clima (Parmesan, 2005).

## CUADRO 56. META-ANÁLISIS DE CAMBIOS EN LA FENOLOGÍA Y DISTRIBUCIÓN DE ESPECIES OBSERVADOS EN LOS PASADOS 20 A 140 AÑOS

Predicción de cambio climático	Cambio acorde a la predicción	Cambio opuesto a la predicción	P-value
Extensiones de los polos o sobre el rango de las especies fronterizas; retracciones ecuatoriales o rangos inferiores fronterizos (177 cambios/279 total)	81% de cambios 51% del total	19% de cambios 12% del total	$< 0.1 \times 10^{-12}$
Predicciones de comunidad (abundancia): especies adaptadas al frío declinando y especies adaptadas a climas cálidos incrementando (283 cambios/641 total)	82% de cambios 36% del total	18% de cambios 8% del total	$< 0.1 \times 10^{-12}$

Nota: De 920 especies, 373 (41%) mostraron cambios en la dirección de la predicción. Datos derivados de la literatura para un mínimo de 1,598 especies o grupos funcionales mostraron que 944 (59%) han indicado un detectable cambio fenológico o distribucional, ya sea en la dirección predicha por el cambio climático regional o en la dirección opuesta.

Fuente: adaptado de Parmesan y Yohe, 2003.

- En periodos moderados de tiempo, los cambios en la temperatura y de precipitación de día se traduce en ajustes en los animales de su temperatura corporal, tamaño y obscuridad (Loeschcke Bundgaard y Baker, 2000; Zwaan et al., 2000, y Dennis y Shreevee, 1989). Asimismo, cambian los hábitos y crecimiento de los animales que tienen fases de hibernación (Wed y Sidcole, 1991). Por ejemplo, los llamados de las ranas asociados a los proceso de apareamiento cambian sus patrones con consecuencias sobre el ciclo reproductivo (Gibbs y Breish, 2001). En esta misma línea (Root et al., 2003) realizó un metanálisis con 64 estudios para determinar la magnitud de los cambios fenológicos debido a cambios en temperatura.
- Existen cambios generales en los patrones de migración. Las migraciones actuales, impactadas por el cambio climático, incluyen distancias que exceden los 1,000 metros por año cuando anteriormente era sólo de 100 o 220 metros por año. Estos casos se concentran más en el hemisferio norte donde las distancias son mayores (Malcom et al., 2002). Para Sudamérica se esperan migraciones que incluyan 6 grados de latitud y 500 metros de elevación (Arroyo et al., 1993) mientras que en el caso de México sólo algunas especies se ubican en estos rangos de los 1,000 metros de distancia. Esta mayor dispersión de especies incide negativamente en su capacidad de reproducción. Asimismo, se estima que las especies se han movido alrededor de 6 km por década en promedio (Stern, 2007).
- Los impactos del cambio climático sobre los procesos de migración de la flora y la fauna tendrán consecuencias negativas adicionales. Esto es, las migraciones son individuales o por especie y no se realizan por grupos o conjuntos de especies, con distintas direcciones e intensidades. Así, las migraciones asociadas al clima hacen, por ejemplo, que especies móviles como los pájaros o los insectos se mueven más rápido mientras que reptiles y plantas lo hagan mucho más lento. Ello implica que las comunidades de especies se verán desarticuladas rompiéndose las cadenas alimenticias y de soporte biológico. Existen entonces diversos procesos de interacción entre los diversos organismos vivos, tanto de flora y fauna, que responden de manera asimétrica a cambios climáticos. Estas respuestas asimétricas que se reflejan en diferentes ritmos de migración rompen los procesos de interacción (Root y Hughes, 2005). De este modo, se observa un proceso de desacoplamiento entre migraciones y alimentos (Visser et al., 1998). Por ejemplo, la diseminación de semillas a través de animales se reduce en algunos bosques o selvas (Silman et al., 2003) o cambia de tiempo o Leikoinen et al., (2004) muestra que los pájaros llegan antes.

13. Asimismo, las posibilidades de migración se han reducido drásticamente como consecuencia de la pérdida de los hábitats naturales (Schwartz, 1992 y Pitelka, 1997) y por la presencia de barreras artificiales que reducen las opciones de migración. Este proceso pone en riesgo la sobrevivencia de una cantidad importante de especies. Puede incluso argumentarse que la sinergia entre los impactos climáticos y las migraciones de islas fragmentadas es el principal reto para una gran cantidad de especies; de hecho se espera que a mediados de siglo el cambio climático sea la principal causa de pérdida de *hábitat* intensificando los procesos migratorios (Thomas, *et al.*, 2004). De este modo, las comunidades de especies se verán desarticuladas con consecuencias aún desconocidas donde los impactos de nuevas relaciones entre especies no es posible definirlo en la actualidad (Hannah *et al.* 2002a).
14. Los impactos climáticos en el mar son el resultado de una multiplicidad de factores tales como los cambios en las temperaturas de superficie, en el nivel del mar, concentraciones de CO<sub>2</sub> y la radiación ultra violeta (Roy y Pandolfi, 2005). Las consecuencias de este proceso se reflejan en un cambio geográfico en las especies y en su tasa de sobrevivencia (Valentine y Jablonski, 1993, Buzas y Cluver, 1994). De este modo, modificaciones en los patrones climáticos cambia a los tipos de peces y reduce sus acervos (Hoegh, 1999). Por ejemplo, el aumento de la temperatura en el mar afectará negativamente el zooplancton (Mackas *et al.*, 1998 y Hoegh, 1999). Estos impactos son más importantes en el caso en que los cambios climáticos sean abruptos y más volátiles (Kenett y Stott, 1991 y Clarke, 1993). Existen más especies de aguas cálidas por lo que el aumento de la temperatura puede beneficiarlas reduciendo aquellas de climas templados y fríos (Barry *et al.* 1995, Southward *et al.*, 1995). La evidencia disponible al respecto indica que estos procesos ya han sucedido, por ejemplo, Clarke (1993) encuentra evidencia de que animales marinos de sangre fría se extinguieron con la reducción de temperatura en los últimos 200 años. Estos impactos del cambio climático se deben entender además en un contexto más amplio con sistemas degradados por la sobre explotación (Roy y Pandolfi, 2005).
15. El cambio climático en los océanos está asociado a un aumento del CO<sub>2</sub> de modo que el aumento de la temperatura y el CO<sub>2</sub> incrementará la fotosíntesis (Long y Drake, 1991 y 1992). El incremento del CO<sub>2</sub> contribuye con el equilibrio químico actual de los océanos (Drake *et al.*, 2005). Así, se estima que doblar las concentraciones de CO<sub>2</sub> implica reducir el pH de la superficie del agua en 0.4 unidades y de hecho se calcula que ya ocurrió una reducción de 0.1 (Houghton *et al.*, 2001). Ello impactará negativamente a las especies que toleran altas concentraciones de CO<sub>2</sub> (Seibel y Walsh, 2001); en particular se observa un impacto significativo en los corales y en los sistemas coralinos. Así, se estima que la tasa de calcificación se reduce entre 11 y 40% (25% en valor medio) de los corales (Langdom *et al.*, 2000). Esto es, se puede perder hasta un 16% de los corales mundiales en los próximos años como consecuencia del calentamiento global (Hoegh-Guldberg, 1999). En efecto, los corales tienen un límite de tolerancia de 1 o 2 grados sobre la máxima temperatura de verano que se ubica entre 27 a 31 grados dependiendo de la latitud. De este modo, se espera un impacto negativo significativo entre 2030 y 2050 dependiendo del aumento de la temperatura (Hoegh-Guldberg, 1999). El impacto sobre los corales resulta particularmente significativo para el caso de México por sus efectos en las áreas del Caribe (Gardner *et al.*, 2003). Asimismo, se tendrán impactos en otros organismos marinos debidos al aumento de CO<sub>2</sub> y reducción de pH. Se presentarán reducción del crecimiento de bacterias y fitoplancton (Knutzen, 1981, Hinga, 2002 y Riebesell *et al.*, 2000). Reducción en la calcificación de fitoplancton y corales (Riebesell *et al.*, 2000, Kleypas *et al.*, 1999 y Langdon *et al.*, 2000). Diversos moluscos presentan disolución de concha, aumento de la mortalidad y discapacidad para transportar oxígeno (Lindinger *et al.*, 1984, Knutzen 1981, y Pörtner y Reipschläger, 1996) (Cuadro 57).

## CUADRO 57. ORGANISMOS MARINOS SENSIBLES A NIVELES ELEVADOS DE CO<sub>2</sub> Y NIVELES REDUCIDOS DE PH

Especies	Descripción	Agua de Mar pH/CO <sub>2</sub>	Sensibilidad	Referencias
Bacterias Bacteria Aerobia Heterótrofa		7.5 7.4	Crecimiento reducido Tasa de crecimiento reducida Reducción de calcificación en 16%	Knutzen 1981 Hinga 2002
Fitoplancton <i>Cricosphaera elongata</i> <i>Emiliana huxleyi</i> <i>Gephyrocapsa oceánica</i> <i>Gonyaulax polyedra</i> <i>Thoracosphaera hemii</i>		7.9 7.6 7.9 7.6-7.8 7.6-7.8	Tasa de crecimiento solo 10% de control en pH 8.2 Reducción de calcificación de 45% Mortalidad relacionada al control de pH 8.2 Crecimiento irregular relacionado a pH 8.2	Riebesell <i>et al.</i> , 2000 Hinga 2002 Hinga 2002
Cnidaria Corales		2 X CO <sub>2</sub> pre-industrial	Caída de 40% en la calcificación	Kleypas <i>et al.</i> , 1999 Langdon <i>et al.</i> , 2000
Moluscos <i>Clío pyramidata</i> <i>Mytilus edulis</i> <i>Pinctata fuscala</i> <i>Ille illecebrosus</i>	Pteropodo Mejillón de mar Ostra de perla japonesa Ostrácodo	7.56-7.39 7.1/6.5 mm 7.7 >7.4 7.5/1.5 mm	Disolución de concha Disolución de concha Disolución de concha, reducido crecimiento Mortalidad creciente Discapacidad para transportar oxígeno/reducido ámbito de actividad debido a una elevada sensación de proteínas respirables	Fabry Lindinger <i>et al.</i> , 1984 Knutzen 1981 Pörtner y Reipschläger 1996
Artrópoda <i>Euphausia pacífica</i> <i>Paraeuchaeta elongata</i> <i>Conchoecia sp.</i> Chaetognatha <i>Sagitta elegans</i> Echinodermata <i>Strongylocentrotus purpuratus</i> <i>Cystechinus sp.</i>	Camarón krill Mesopelágico copépodo Ostracoda Chaetognatha Erizo Erizo de mar profundo	7.54, LC <sub>0</sub> 7.41, LC <sub>0</sub> 7.79, LC <sub>0</sub> 7.76, LC <sub>0</sub> 7.8	Mortalidad observada debajo de LC <sub>0</sub> ; en todos los casos, la supervivencia declino con la exposición al tiempo, disminución de pH Alta sensibilidad inferida por la falta de regulación de pH y una pasiva barrera vía examen de disolución durante la emersión 80% menos de mortalidad simulando secuestro de CO <sub>2</sub>	Yamada y Ikeda 1999 Burnett <i>et al.</i> , 2002; Spicer 1995 Barry <i>et al.</i> , 2002
Vertebrata <i>Scyliorhinus canicula</i>	Pez-perro	7.7/1 mm Hg	Incremento en ventilación	Truchot 1987

Fuente: IPCC (2007)

### Efectos en los arrecifes de coral por el cambio climático

Los arrecifes son un hábitat para aproximadamente una cuarta parte de las especies marinas siendo las más diversas entre los ecosistemas marinos (Roberts *et al.*, 2002; Buddemeier *et al.*, 2004). Ellos sustentan la protección de la costa local, la pesca, el turismo (Hoegh-Guldberg *et al.*, 2000; Cesar *et al.*, 2003; Willig *et al.*, 2003; Hoegh-Guldberg, 2004, 2005) y suministran 2-5% de la cosecha mundial de la pesca, integrada por una crítica subsistencia de proteínas y fuente de ingresos en el mundo en desarrollo (Whittingham *et al.*, 2003; Pauly *et al.*, 2005; Sadovy, 2005).

Los corales se ven afectados por el calentamiento de las aguas superficiales (Reynaud *et al.*, 2003; McNeil *et al.*, 2004; McWilliams *et al.*, 2005) conduce a la decoloración (pérdida de algas simbiotes). Muchos estudios incontrovertiblemente enlazan a la decoloración de los corales más cálidos con la temperatura superficial del mar (McWilliams *et al.*, 2005) y la masa de decoloración de corales y la mortalidad a menudo más allá de los resultados clave de los umbrales de temperatura. La superación de los umbrales de blanqueamientos anuales o semestrales se proyecta en la mayoría de los arrecifes en todo el mundo para el año 2030 a 2050 (Hoegh-Guldberg, 1999; Sheppard, 2003; Donner *et al.*, 2005). Después del blanqueado, las algas colonizan rápidamente corales muertos, y posiblemente más tarde inhibirán la reproducción del coral (McClanahan *et al.*, 2001; Szmant, 2001; Gardner *et al.*, 2003; Jompa y McCook, 2003). La modelización predice una fase de algas que cambian a una posición dominante en la Gran Barrera de Coral y los arrecifes del Caribe en el año 2030 a 2050 (Wooldridge *et al.*, 2005).

Los arrecifes de coral se verán afectados por el aumento de las concentraciones de CO<sub>2</sub> atmosférico (Orr *et al.*, 2005; Raven *et al.*, 2005; Denman *et al.*, 2007), resultando una disminución de la calcificación. Los experimentos de las concentraciones de aragonito han demostrado una reducción de la calcificación de los corales (Marubini *et al.*, 2001; Langdon *et al.*, 2003; Hallock, 2005), debilitamiento del esqueleto de coral (Marubini *et al.*, 2003) y una fuerte dependencia a la temperatura (Reynaud *et al.*, 2003). Las proyecciones de pH oceánico disminuyeron en una mayor tasa y un nivel inferior al experimentado en los últimos 20 millones de años (Caldeira y Wickett, 2003; Raven *et al.*, 2005; Turley *et al.*, 2006). La duplicación de CO<sub>2</sub> incide en la reducción de la calcificación de los corales aragoníticos en un 20% - 60% (Kleypas *et al.*, 1999; Kleypas y Langdon, 2002; Reynaud *et al.*, 2003; Raven *et al.*, 2005). En 2070 muchos arrecifes podrían llegar a la saturación crítica de estados aragonito (Feely *et al.*, 2004; Orr *et al.*, 2005), lo que resulta en una reducción cubierta de corales y una mayor erosión de arrecifes (Kleypas *et al.*, 2001; Guinotte *et al.*, 2003).

La adaptación natural a los cambios simbiotes con 2°C y la resistencia puede retrasar la desaparición de algunos arrecifes hasta aproximadamente el 2100 (Sheppard, 2003), en lugar de mediados de siglo (Hoegh-Guldberg, 2005), aunque esto puede variar ampliamente en todo el mundo (Donner *et al.*, 2005). Las estimaciones del calentamiento de agua cubierta de corales en los últimos 20-25 años son 30% o más (Wilkinson, 2004; Hoegh-Guldberg, 2005) debido en gran medida al aumento de la temperatura mínima superficial TMS (Hoegh-Guldberg, 1999). En algunas regiones, como el Caribe, las pérdidas de coral se han estimado en 80% (Gardner *et al.*, 2003). La migración de coral a latitudes más altas, con TMS es poco probable, debido a disminución latitudinal de las concentraciones de aragonito y las proyecciones de aumentos de CO<sub>2</sub> atmosférico (Kleypas *et al.*, 2001; Guinotte *et al.*, 2003; Orr *et al.*, 2005; Raven *et al.*, 2005). La migración de coral también está limitada por la falta de sustrato disponible. La elevada TMS y la disminución de aragonito tienen una compleja sinergia (Harvell *et al.*, 2002; Reynaud *et al.*, 2003; McNeil *et al.*, 2004; Kleypas *et al.*, 2005), pero puede producir grandes cambios en los arrecifes de coral (Guinotte *et al.*, 2003; Hoegh-Guldberg, 2005). Los corales podrían convertirse en raros arrecifes tropicales y subtropicales en el 2050 debido a los efectos combinados del aumento de CO<sub>2</sub> y el aumento de la frecuencia de sucesos de blanquimiento (2-3 × CO<sub>2</sub>) (Kleypas y Langdon, 2002; Hoegh-Guldberg, 2005; Raven *et al.*, 2005). Otros factores del cambio climático (como el aumento en el nivel del mar, el impacto de tormentas y los aerosoles) y los factores no climáticos (como la pesca excesiva, invasión de especies no autóctonas, contaminación, nutrientes y sedimentos) (aunque esto también podría estar relacionado con los cambios climáticos a través de cambios en las precipitaciones y caudales) añadirían múltiples impactos sobre los arrecifes de coral el aumento de su vulnerabilidad y reducir la resistencia al cambio climático (Koop *et al.*, 2001; Kleypas y Langdon, 2002; Cole, 2003; Buddemeier *et al.*, 2004).

16. El aumento esperado en el nivel del mar (IPCC, 2001b, Church *et al.*, 2001, IPCC, 2001) implicará una pérdida del 80% de los humedales (Hoegh-Guldberg, 1999) Asimismo, se esperan cambios significativos en las corrientes marinas que afectarán la conectividad genética entre poblaciones marinas (Hoegh-Guldberg, 1999).

17. Los impactos del cambio climático en el agua dulce se traducen en un aumento de las especies cálidas en ríos y lagos (Allan, 2005). Ello puede afectar la producción de salmón y de otras especies de alto valor comercial (Allan, 2005)
18. Los impactos del cambio climático sobre el DNA de los diversos organismos vivos depende fundamentalmente de los límites ambientales de las especies y de su nicho de adaptación (Hewitt, 1993). De este modo, la presencia de nichos de biodiversidad se reducirá como consecuencia de su aislamiento. En este sentido, existe una correlación positiva entre menos diversidad y caída de la población. Así, el ritmo tan intenso de adaptación no corresponde necesariamente a los ritmos de ajuste del DNA lo que puede reducir su variabilidad (Hewitt, 1993).
19. Los cambios climáticos inducirán cambios de uso de suelo y en particular se traducirán en la destrucción de áreas de bosques o de cierto tipo de bosques lo que incide, a su vez, en cambios en la temperatura del suelo, en la evotranspiración y por tanto en el agua disponible (Betts *et al.*, 2004). Estos impactos generan modificaciones importantes en la flora y la fauna de las regiones afectadas. La evidencia disponible a este respecto muestra que movimientos de la vegetación de alrededor de 6.1 kilómetros en el tipo de árboles hacia el norte (Parmesan y Yohe, 2003). Muchas especies muestran tendencias similares de incremento en el crecimiento de los límites de vegetación arbórea durante los calentamientos en los años 30 y 40, y en el reciente calentamiento de los últimos 20 años (Shiyatov, 1983, Meshinev *et al.*, 2000 y Kullman, 2001). Este proceso de deforestación, en conjunto con un mayor aumento del CO<sub>2</sub>, cambios en los patrones de lluvia y mayor temperatura se traducirá en un mayor número de incendios forestales (Costa y Foley, 2000, Defries *et al.*, 2002). Se estima que estos incendios en zonas tropicales pueden destruir el 40% de los árboles y el 40% de la biomasa (Cochrane y Shulze, 1999).

#### Incendios forestales

Los aumentos predichos en niveles de CO<sub>2</sub> y deforestación generan climas más secos y cálidos (Costa y Foley, 2000; Zhang *et al.*, 2001; Defries *et al.*, 2002), lo que incide en un aumento en la quema de bosques. Los incendios en las selvas tropicales son una grave perturbación, debido a que no están preparados por la evolución para tales eventos, y más si son frecuentes. Algunas especies de árboles tienen la capacidad de regenerarse significativamente, otros se regeneran de forma más fortuita pero sólo en la ausencia de futuros incendios. La respuesta de la fauna a los incendios depende de las especies, (Barlow *et al.*, 2002), pero finalmente depende de la severidad del incendio. La fragmentación y el cambio de la cobertura vegetal interactúan sinérgicamente para exponer más a los bosques a los incendios y consecuentemente aumenta el riesgo de incendios no intencionados (Cochrane, 2001).

Un incendio en la selva tropical podría eliminar a cerca de 40% de los árboles (mayores o iguales a 10 cm de diámetro) pero reduciría la biomasa viva en 10%, porque sólo pocos árboles grandes se morirían, los cuales componen la mayor parte de la biomasa. Si el bosque se vuelve a incendiar dentro de unos cuantos años del incendio inicial, el último incendio será mucho peor. En los incendios recurrentes, la longitud de llama, la profundidad de la llama, las tasas de propagación, los tiempos de duración, y la intensidad de la línea de fuego son significativamente más altos. Un segundo incendio puede matar a otro 40% de los árboles restantes, en esta ocasión corresponde al 40% de la biomasa viva. En los bosques que se reincendian, los grandes árboles no tienen mayor ventaja de sobrevivencia que los árboles pequeños porque los cambios en el comportamiento del fuego sobrepasan incluso las defensas de los más grandes y duros árboles (Cochrane *et al.* 1999) pastos y arbustos, algunos de las cuales son muy inflamables, aun cuando están verdes, rápidamente invaden los bosques que se han quemado dos veces. El proceso es; la quema de estos bosques siempre verdes crea una retroalimentación positiva tanto en la susceptibilidad de incendios y la gravedad del incendio. Esto significa que los incendios se vuelven no sólo más frecuentes sino mucho peores cada vez. El resultado final puede ser la destrucción completa de los bosques afectados.



El conjunto de estos resultados muestran que los impactos del cambio climático son ciertamente relevantes y deben contemplarse de una forma agregada al incidir sobre todas las especies; ello no obstante que muchos de estos análisis contemplan a las especies por separado (Overpeck *et al.*, 2005). Esto es, aquellos impactos climáticos registrados que inciden inicialmente en las especies con mayor movilidad conllevan, a través de la cadena alimenticia, a respuestas diferenciadas por una multiplicidad de especies (Turnock *et al.*, 1997). En este contexto debe considerarse que la biodiversidad se distribuye de manera heterogénea en el planeta y desde luego en México y que por tanto los impactos son diferenciados. De hecho, una gran parte de la biodiversidad actual se concentra en algunos pequeños espacios geográficos (Myers *et al.*, 2000). Las consecuencias de estas respuestas diferenciadas se amplía como consecuencia de los procesos de migración y adaptación diferenciados y la presencia de espacios geográficos confinados donde se concentra la biodiversidad. Así, el rompimiento de los nichos de biodiversidad conlleva a daños mayores (Peterson *et al.*, 2002). Estos impactos incluyen cambios en la evolución, de rangos de movimientos y de fenología y en donde estos nuevos impactos climáticos impiden que los procesos naturales se renueven armónicamente (Hannah *et al.*, 2002a).

Las posibilidades de extinción de especies se relaciona, con diversos factores y no es desde luego lineal, pero se observa que buena parte de estos elementos tiene una importante influencia en México actualmente, y se refieren al tamaño del rango, la densidad en el rango o la abundancia de su hábitat preferido (Wilson *et al.*, 2004, IPCC, 2007) así como la invasión de otras especies, la disponibilidad de recursos (Davis *et al.*, 2000, IPCC, 2007), además de la temperatura y la precipitación (Davis *et al.*, 2006). Las tasas estimadas de extinción para Norteamérica se reportan en el Cuadro 58 (Ricciardi y Rasmussen, 1999). Para los pájaros, reptiles y mamíferos terrestres se estima en 0.7% y alrededor de 3% para la fauna de agua dulce como consecuencia de la deterioración extensiva del hábitat causada por la descarga de sedimentos, contaminación orgánica por actividades del uso del suelo, contaminantes tóxicos de fuentes municipales e industriales, fragmentación de corrientes y regulación de flujos por represas, proyectos de drenado y canalización, e interacción con un creciente número de especies exóticas (Benke 1990, Allan y Flecker, 1993, Neves *et al.*, 1997, Ricciardi *et al.*, 1998).

## CUADRO 58. TASAS DE EXTINCIÓN ESTIMADAS DE LA FAUNA DE NORTEAMÉRICA (PÉRDIDA EN PORCENTAJE POR DÉCADA)

Fauna de agua dulce	Actual	Futura	Fauna terrestre y marina	Actual	Futura
Peces	0.4	2.4	Pájaros	0.3	0.7
Cangrejos	0.1	3.9	Reptiles	0	0.7
Mejillones	1.2	6.4	Mamíferos terrestres	0	0.7
Gasterópodos	0.8	2.6	Mamíferos marinos	0.2	1.1
Anfibios	0.2	3.0			
<b>Tasa media</b>	<b>0.5</b>	<b>3.7</b>		<b>0.1</b>	<b>0.8</b>

Notas: Los datos fueron obtenidos de fuentes publicadas para peces (Miller *et al.* 1989; William *et al.* 1989), cangrejos (Taylor *et al.* 1996), mejillones (Williams *et al.* 1993), Bogan 1996; Turgeon *et al.* 1998); y gasterópodos (Neves *et al.* 1997; Turgeon *et al.* 1998). Los datos para anfibios, pájaros, reptiles y mamíferos fueron obtenidos de The Natural Heritage Central Databases (The Nature Conservancy y the international Network of Natural Heritage Programs, Noviembre 1997).

A nivel agregado se observa que existen aún pocos estudios que analizan el cambio de rango de especies (Parmesan, 1996 y Parmesan *et al.*, 1999). Sin embargo, la evidencia disponible muestra que para Norteamérica y Europa las dos terceras partes de las 58 especies estudiadas cambiaron su rango hacia el norte (Parmesan, 1996 y Parmesan *et al.*, 1999). La evidencia de estos cambios de días en eventos fenológicos en el periodo de primavera se sintetizan en el Cuadro 59. Asimismo, se estima que un aumento de temperatura de entre 2 y 3 °C pone en peligro de extinción a entre el 15 y el 40% de las especies (Stern, 2007).

Los metanálisis realizados muestran, por ejemplo, que los impactos registrados en 505 de las especies estudiadas, incluyendo 30 estudios y 1,700 especies, muestran impactos en fenología y distribución (Cuadro 60). Además se observan cambios significativos en los ciclos de vida de los animales. Por ejemplo, Parmesan y Yohe (2003) encuentran en más de 1,700 especies cambios de 6.1km por década al norte y avance de 2.3 días de la primavera por década y Root, (2003) argumenta evidencia de un avance de 5 días de la primavera en los últimos 30 años.

## CUADRO 59. CAMBIOS EN LA DURACIÓN DE EVENTOS FENOLÓGICOS EN PRIMAVERA

Lugar	Periodo	Especies/Indicador	Cambios observados (días por década)	Referencias
Oeste de E.U.A.	1957 – 1994	Lila, madreSelva (F)	-1.5 (lila), 3.5 (madreSelva)	Cayan <i>et al.</i> , 2001
Noreste de E.U.A	1965 – 2001 1959 – 1993	Lila (F,D) Lila (F)	-3.4 (F) , -2.6 (D) -1.7	Wolfe <i>et al.</i> , 2005 Schwartz y Reiter, 2000
Washington, DC	1970 – 1999	100 especies de plantas (F)	-0.8	Abu-Asab <i>et al.</i> , 2001
Alemania	1951 – 2000	10 fases de primavera (F,D)	-1.6	Menzel <i>et al.</i> , 2003
Suiza	1951 – 1998	9 fases de primavera (F,D)	-2.3(*)	Defila y Clot, 2001
Sur-Centro de Inglaterra	1954 – 2000	385 especies (F)	-4.5 días en los 90's	Fitter y Fitter, 2002
Europa (jardines fenológicos)	1959 – 1996 1969 – 1998	Diferentes fases de primavera (F,D)	-2.1 -2.7	Menzel y Fabian, 1999; Menzel, 2000; Chmielewski y Rotzer, 2001
21 países europeos	1971 – 2000	F, D de diversas plantas	-2.5	Menzel <i>et al.</i> , 2006 b
Japón	1953 – 2000	<i>Ginko Biloba</i> (D)	-0.9	Matsumoto <i>et al.</i> , 2003
Eurasia del Norte	1962 – 2004	NDVI	-1.5	Delbart <i>et al.</i> , 2006
Reino Unido	1976 – 1998	Apariencia de la mariposa	-2.8 a -3.2	Roy y Sparka, 2000
Europa, Norte de América	30-60 años anteriores	Migración de primavera de especies de aves	-1.3 a -4.4	Crack <i>et al.</i> , 1997; Crack y Sparks, 1999; Dunn y Winkler, 1999; Inouye <i>et al.</i> , 2000; Bairlein
Norte de América (US-MA)	1932 - 1993	Llegada de primavera de 52 especies de aves	+0.8 a -9.6(*)	Butler, 2003
Norte de América (US-IL)	1976 - 2002	Llegada de 8 especies silbadoras	+2.4 a -8.6	Strode, 2003
Inglaterra (Condado de Oxford)	1971 – 2000	Migración de amplia distancia de 20 especies	+0.4 a -6.7	Cotton, 2003
Norte de América (US-MA)	1970 – 2002	Llegada de primavera de 16 especies de aves	-2.6 a -10.0	Ledneva <i>et al.</i> , 2004
Suecia (Ottenby)	1971 - 2002	Llegada de primavera de 36 especies de aves	+2.1 a -3.0	Stervander <i>et al.</i> , 2005
Europa	1960 – 2002	Producción de huevos 1 especie	-1.7 a -4.6	Both <i>et al.</i> , 2004
Australia	1970 - 1999	11 aves migratorias	9 especies adelantan llegada	Green y Pickering, 2002
Australia	1964 - 2003	2 aves migratorias de primavera	1 especie adelanta llegada	Chambers <i>et al.</i> , 2005

Fuente: IPCC, 2007



## CUADRO 60. CAMBIOS FENOLÓGICOS Y DE DISTRIBUCIÓN DE ESPECIES SALVAJES

Taxón	Referencia	No. Total de especies	Escala espacial			Escala de tiempo (rango años)	Cambio de orientación previsto	Cambio de predicción	Estable	No predicción
			L	R	C					
<b>CAMBIOS FENOLÓGICOS</b>										
Plantas leñosas	Ahas, 1999; Menzel <i>et al.</i> , 2001; Menzel y Fabian, 1999*; Menzel 2000*	n=38 sp		2	1	35-132	30	1	7	-
Plantas herbáceas	Ahas, 1999; Bradley, 1999*	n=38 sp	1	1		63-132	12	-	26	-
Mezcla de plantas	Filter & Filter, 2002*	n=385 sp	1			46	279	46	60	-
Aves	Ahas, 1999; Bradley, 1999*; Crick <i>et al.</i> , 1997; Crick & Sparks, 1999; Dunn & Winkler, 1999; Gatter <i>et al.</i> , 1992	n=168 sp	2	3	1	21-132	78	14	76	-
Insectos	Roy & Sparks 2000	n=35 sp		1		23	13	-	22	-
Anfibios	Beebee, 1995; Gibbs & Breisch, 2001	n=12 sp	2			16-99	9	-	3	-
Peces	Ahas, 1999	n=2 sp		1		132	2	-	-	-
<b>DISTRIBUCIÓN /Cambios abundantes</b>										
Líneas de árboles	Kullman, 2001; Paytte <i>et al.</i> , 1989; Ross <i>et al.</i> , 1994*	n = 4 sp + 5 grps	2	1		70-1,000	3 sp + 5 grupos	-	1	-
Hierbas y arbustos	Grabherr <i>et al.</i> , 1994; Grabherr <i>et al.</i> 1995; Sturm <i>et al.</i> , 2001*; Smith 1994*	n > 66 sp, 15 detallado		3		28-80	13	2	-	-
Líquenes	van Hark <i>et al.</i> 2002	4 grupos biogeográficos (n=329 sp)	1			22	43	9	113	164
Aves	Smith, R. C. <i>et al.</i> 1999*	n=3 sp		1		50	3	-	-	-
	Thomas & Lennon, 1999; Johnson 1994*	N sp (n=46 sp)		2		20-36	13	15	18	
		S sp (n=73 sp)		2		20-36	36	16	21	6
	Pounds <i>et al.</i> , 1999*	Baja elevación (>91 sp)	1			20	71	11	9	-
Alta elevación (>96 sp)		1			20	37	27	32	-	
Mamíferos	Hersteinsson & McDonald, 1992	n= 2 sp		1		52	2	-	-	-

## CUADRO 60. CAMBIOS FENOLÓGICOS Y DE DISTRIBUCIÓN DE ESPECIES SALVAJES (CONTINUACIÓN)

Taxón	Referencia	No. Total de especies	Escala espacial			Escala de tiempo (rango años)	Cambio de orientación previsto	Cambio de predicción	Estable	No predicción
			L	R	C					
Insectos	Parmesan <i>et al.</i> , 1999; Parmesan 1996*	n=36 sp		1	1	98-137	23	2	10	1
	Parmesan <i>et al.</i> , 1999	N fronteras (n=52 sp)		1		98	34	1	17	-
		S fronteras (n=40 sp)		1		98	10	2	28	-
Reptiles y anfibios	Pounds <i>et al.</i> , 1999*	n= 7 sp	1			17	6	-	1	-
Peces	Holbrook <i>et al.</i> , 1997	4 grupos biogeográficos (n=83 sp)	1			-	2 grupos	-	1 grupo	1 grupo
	Southward <i>et al.</i> , 1995*	N sp (n>1)		1		70	>1	-	-	-
		S sp (n>1)		1		70	>1	-	-	-
Invertebrados marinos	Gagarin, 1999*; Southward <i>et al.</i> , 1995*	N sp (n>21)	1	1		66-70	>19	2	-	> 1 sp no clasificado
		S sp (n>21)	1	1		66-70	>20	1	-	
		Cosmopolita sp (n=28 sp)	1			66	-	-	-	28
Zooplankton marino	Southward <i>et al.</i> , 1995*	Agua fría (n>10 sp)		1		70	>10	-	-	> 8 grupos no clasificados
		Agua caliente (n>14 sp)		1		70	>14	-	-	
	Blaugrana <i>et al.</i> , 2002	6 grupos biogeográficos (n ≥36 sp)			1	39	6 grupos	-	-	-

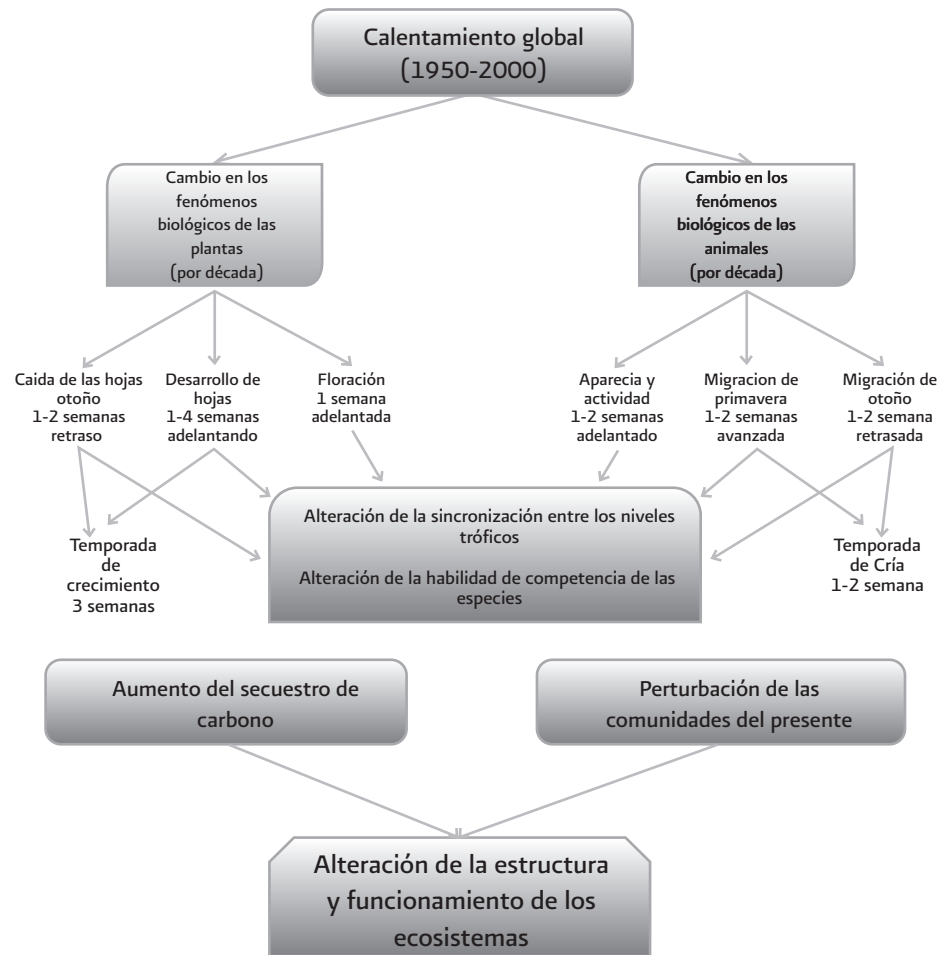
Notas: N, especies con distribuciones norte generalmente (boreal /ártico); S especies con distribuciones sur en general (templado) L, local; R, regional (una parte sustancial de la distribución de las especies, por lo general a lo largo de una única gama de borde); C, continental (la mayoría o la totalidad de una distribución de especies). No predicción indica que un cambio puede haber sido detectado, pero que este fue ortogonal a las predicciones de calentamiento global, o que fue confundida por factores no climáticos, o no hay suficiente base teórica para predecir un cambio de las especies o del sistema con el cambio climático.

\*Estudio parcialmente controlado de no influencias humanas climáticas (por ejemplo cambio del uso de suelo). Estudios que se confunden con factores no climáticos fueron excluidos (Véase Información suplementaria para más detalles clasificación de las especies.)

Fuente: Parmesan y Yohe (2003)

En la Figura 14 se sintetizan los principales resultados de las interacciones de los efectos del cambio climático en eventos fenológicos de plantas y animales. Se observa que se adelantan ciclos vitales como floración, desarrollo de hojas, migración de primavera de animales y aparición y actividad de animales y al mismo tiempo, se retrasan ciclos de caídas de hojas y migración de otoño.

Figura 14. Consecuencias ecológicas del calentamiento climático en la fenología de plantas y animales



Fuente: peñuelas y filella, 2001

Los principales impactos en los ecosistemas asociados al cambio climático se sintetizan en el Cuadro 61. A nivel mundial, la diversidad biológica (representado por la riqueza de especies y abundancia relativa) puede disminuir entre un 13% y un 19% debido a una combinación de cambio de uso del suelo, el cambio climático y la deposición de nitrógeno en cuatro escenarios para el año 2050 relativa a las especies presentes en 1970 (Duraiappah *et al.*, 2005). En cuanto a las proyecciones debido a las pérdidas del cambio en el uso del suelo por sí solo (la pérdida de hábitat nativo), se espera una reducción de hábitat en los forestas tropicales y bosques, sabana y bosques mixtos templados de alrededor del 80% de las especies, lo que representa aproximadamente 30,000 especies (Sala, 2005). En general, el cambio climático se ha estimado que sea el mayor conductor de la pérdida de biodiversidad en los bosques de coníferas, sabanas, en sistemas climáticos mediterráneos, los bosques tropicales, en la tundra ártica, y en los arrecifes de coral (Thomas *et al.*, 2004 a, Carpenter *et al.*, 2005, Malcolm *et al.*, 2006). En otros ecosistemas, el cambio de uso del suelo puede ser un fuerte impulsor de la pérdida de la diversidad biológica por lo menos en el corto plazo. Las tasas de extinción inducidas por el cambio climático en *hot-spots* de biodiversidad tropical es probable que exceda las previsiones derivadas de extinción por deforestación durante este siglo (Malcolm *et al.*, 2006).

## CUADRO 61. IMPACTOS PROYECTADOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LOS ECOSISTEMAS Y LOS SISTEMAS POBLACIONALES

$\Delta T_g > EP^1$	$\Delta T_g > EP^2$ (rango)	$\Delta T_g > 1990$ (rango)	Impactos	Región	Referencias
0.6			Aumento en el blanqueamiento de los corales.	Caribe, Océano Índico, Grandes barreras coralinas	Hoegh-Guldberg, 1999
0.6			Extinciones de anfibios/riesgos de extinciones en las montañas debido a brotes de enfermedades inducidos por el CC.	Costa Rica, España, Australia	Pounds et al., 2006; Bosch et al., 2006
<1.0	1.1-1.6		Ecosistemas marinos afectados por reducciones continuas en el Krill, afectando posiblemente las poblaciones de los pingüinos Adelie; daños incrementales en los ecosistemas del Antártico.	Antártica, Ártico	Forcada et al., 2006; Symon et al., 2005; Zöckler y Lysenko, 2000
1.3	1.2-2.0	1	Pérdida del 8% en hábitats de peces de aguas dulces, 15% de pérdidas en la Cadena montañosa del Oeste de América del Norte (Rocky Mountains), 9% del salmón.	Norteamérica	Preston, 2006
1.6		0.7-1.5	Del 9 al 31 % (promedio 18%) de las especies comprometidas a la extinción.	Global <sup>3</sup>	Thomas et al., 2004 a
1.6			Contenedores bioclimáticos eventualmente excedidos, llevan al 10% de la transformación de los ecosistemas globales, la pérdida del 47% de la tundra boscosa, el 23% del bosque de coníferas fresco, el 21% de los matorrales, el 15% de los pastizales/estepas, el 14% de la sabana, el 13% de tundra y el 12% de bosque caducifolio templado. Los ecosistemas variados pierden 2-47% de su extensión.	Global	Leemans y Eickhout, 2004
1.6	1.1-1.2	1	Clima apropiado para el 25% de los eucaliptos extras.	Australia	Hughes et al., 1996
1.7	1-2.3	1°C SST	Todos los arrecifes de coral blanqueados.	Gran Barrera de Coral, Asia, el Caribe	Hoegh-Guldberg, 1999
1.7	1.2-2.6		38-45% de las plantas en el Cerrado tienden a la extinción.	Brasil	Thomas et al., 2004a, Siquiera y Peterson, 2003
1.7	1.3-3		2-18% de los mamíferos, 2-8% de las aves y 1-11% de las mariposas tienden a la extinción.	México	Thomas et al., 2004a, Peterson, et al., 2002.
1.7	1.3-2.4	2	16% del hábitat de peces de agua dulce perdido, 28% de pérdida en Montañas Rocosas, 18% de pérdida en salmón.	Norteamérica	Preston, 2006
<1.9	<1.6-2.4	<1	Rango de pérdida comenzando por el pájaro cenador dorado.	Australia	Hilbert et al., 2004
1.9	1.6-2.4	1	7-14% de reptiles, 8-18% de ranas, 7-10% de aves y 10-15% de mamíferos que tienden a la extinción así como el 47% de habitantes procedentes de Queensland perdidos.	Australia	Thomas et al., 2004a, Williams et al., 2003
1.9	1.6-2.4	1	Rango de pérdida de 40-60% para el pájaro cenador dorado.	Australia	Hilbert et al., 2004
1.9	1.0-2.8		La mayoría de la áreas experimentó un incremento de 8-20% en el número > 7 a días con un índice temporal de fuego para bosques >45, el incremento de la frecuencia de fuegos convierte bosques y maquis en matorral, lleva a mayores brotes de plagas.	Mediterráneo	Moriendo et al., 2006
2.1			Pérdida del 41-51% de la riqueza de especies de plantas endémicas.	Sudáfrica, Namibia	Broennimann et al., 2006
2.1	1.0-3.2	1-2	El Sistema Alpino puede tolerar que la temperatura local suba 1-2°C; la tolerancia probablemente es negada por el cambio de uso de tierra.	Europa	Theurillat y Guisan, 2001
2.1		1.4-2.6	13-23% de mariposas tienden a la extinción.	Australia	Thomas et al., 2004a, Beaumont y Hughes, 2002
2.1	1.4-2.6		Contenedores bioclimáticos con un exceso de 2-10% de plantas, provocan peligro o extinción, significa especies de vuelta de 48% (rango espacial de 17-75%), significa especies perdidas de 27% (rango espacial de 1-68%).	Europa	Thuiller et al., 2005b
2.2			3-16% de plantas tienden a la extinción.	Europa	Thomas et al., 2004a
2.2	2.1-2.3	1.6-1.8	15-37% (principal 24%) tienden a la extinción.	Global <sup>3</sup>	Thomas et al., 2004a
2.2	1.7-3.2		8-12% de 277 especies mamíferos medianos/largos en 141 parques nacionales están críticamente dañados o extintos, 22-25% están dañados.	África	Thriller et al., 2005b
2.3	1.5-2.7	2°C SST	Pérdida de bivalvos y lapas antárticas.	Océano Austral	Peck et al., 2004

## CUADRO 61. IMPACTOS PROYECTADOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LOS ECOSISTEMAS Y LOS SISTEMAS POBLACIONALES (CONTINUACIÓN)

$\Delta T_g > EP^1$	$\Delta T_g > EP^2$ (rango)	$\Delta T_g > 1990$ (rango)	Impactos	Región	Referencias
2.3	2.0-2.5		Declinación de la población de peces, ecosistemas húmedos se secan y desaparecen.	Malawi, Grandes Lagos Africanos	ECF, 2004
2.3	1.5-2.7	2.5-3.0	Extinción (100% del rango potencial perdido) del 10% de las especies endémicas, 51-65% de pérdida en los Fynbos; incluye de 21-40% Proteáceas que tienden a la extinción; el área de Succulent Karoo reducida en 80%; 2,800 especies de plantas amenazadas de extinción y 5 parques pierden más del 40% de sus especies de plantas.	Sudáfrica	Thomas et al., 2004a; Rutherford et al., 2000;
Midgley et al., 2002; Hannah et al., 2002a	2.3-4.0	2.5-3.0	24-59% de mamíferos, 28-40% de aves, 13-70% de mariposas, 18-80% de otros invertebrados sudafricanos y 21-45% de reptiles tienden a la extinción; 66% de especies animales potencialmente perdidas del Parque Nacional de Kruger	Sudáfrica	Thomas et al., 2004a; Erasmus et al., 2002
2.3	2.3-4.0	2.5-3.0	24-59% de mamíferos, 28-40% de aves, 13-70% de mariposas, 18-80% de otros invertebrados sudafricanos y 21-45% de reptiles tienden a la extinción; 66% de especies animales potencialmente perdidas del Parque Nacional de Kruger.	Sudáfrica	Thomas et al., 2004a; Erasmus et al., 2002
	1.6-3.2		48-57% de las plantas de Cerrado tienden a la extinción	Brasil	Thomas et al., 2004a
			Cambios en la composición del ecosistema, 32% de las plantas salieron del 44% del área de potencial extinción de plantas endémicas	Europa	Bakkenes et al., 2002
2.3	2.2-4.0		2-20% de mamíferos, 3-8% de aves y 3-15% de mariposas tienden a la extinción.	México	Erasmus et al., 2002
2.3	1.6-3.2		48-57% de las plantas de Cerrado tienden a la extinción.	Brasil	Thomas et al., 2004a
2.3			Cambios en la composición del ecosistema, 32% de las plantas salieron del 44% del área de potencial extinción de plantas endémicas.	Europa	Bakkenes et al., 2002
2.3	1.6-3.2	3	Pérdida del hábitat de 44% de los peces de agua dulce, 40% de pérdida de las Montañas Rocosas y pérdida del salmón en 27%.	Norteamérica	Preston, 2006
2.4			63 de 165 ríos en estudio sufrieron pérdidas > 10% de sus especies de peces.	Global	Xenopoulos et al., 2005
2.4			Rango bioclimático de 25-57% (totalmente disperso) o 34-76% (no disperso) de 5,197 especies de plantas sobrantes.	África Subsahariana	McClellan et al., 2005
>2.5			Función de limpieza de santuarios de biosferas terrestres que empieza a recaer en las fuentes de carbón.	Global	Halloy y Mark, 2003
2.5		2°C SST	Extinción de los ecosistemas de arrecifes de coral (sobre poblados por algas).	Océano Índico	Sheppard, 2003
2.5	1.9-4.3		El 42% del área terrestre con bioclima diverso actualmente se encuentra aquí; han disminuido las especies de aves de playa y ha aumentado el número de ratones de cuello amarillo; pérdida del hábitat de la vegetación baja en Escocia, potencial invasión de plagas en la vegetación baja de las montañas en Snowdonia.		Berry et al., 2005
			4-21% de las plantas tienden a la extinción	Europa	Thomas et al., 2004a
2.5	2.0-3.0		Gran pérdida de bosques de río en el Amazonas y pérdida en los mismos de biodiversidad.	Sudamérica, Global	Cox et al., 2004; Scholze et al., 2006
2.5			20-70% de pérdida en el hábitat de las aves costeras en 4 ciudades (principal 44%).	E.U.A	Galbraith et al., 2002
2.6	1.6-3.5		La mayoría de las áreas experimentó un incremento de 20-34% en el número > 7 días con un índice temporal de fuego para bosques >45, el incremento de la frecuencia de fuegos convierte bosques y maquis en matorral, lleva a mayores brotes de plagas.	Mediterráneo	Moriondo et al., 2006
	2.3-4.6	2.1-2.5	Regiones de bosque nublado pierden cientos de metros en extensiones elevadas, extinciones potenciales $\Delta T_{reg}$ 2.1 grados Celsius para Centroamérica y $\Delta T_{reg}$ 2.5 grados Celsius para África.	Centroamérica, África Tropical, Indonesia	Still et al., 1999
2.6			4-21% de las plantas tienden a la extinción.	Europa	Thomas et al., 2004a
2.7			Contenedores bioclimáticos excedidos llevan al 16% de la transformación de los ecosistemas globales, la pérdida del 58% de la tundra boscosa, el 31% del bosque de coníferas fresco, el 25% de los matorrales, el 20% de los pastizales/estepas, el 19% de la sabana, el 21% de tundra y el 21% de bosque caducifolio templado. Los ecosistemas variados pierden 5-66% de su extensión.	Global	Leemans y Eickhout, 2004

## CUADRO 61. IMPACTOS PROYECTADOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LOS ECOSISTEMAS Y LOS SISTEMAS POBLACIONALES (CONTINUACIÓN)

$\Delta T_g > EP^1$	$\Delta T_g > EP^2$ (rango)	$\Delta T_g > 1990$ (rango)	Impactos	Región	Referencias
		3.2-6.6	50% de la pérdida existente en la tundra solo es compensado por el 5% de eventual ganancia; millones de diversas especies de aves de playa pierden de 5-57% de área de cría, muchas especies del Ártico alto en peligro, varias especies de gansos pierden 5-56% de su área de cría.	Ártico	Zökler y Lysenko, 2000
2.8	1.2-4.5	1-3	Gran pérdida/conversión del hábitat en la parte húmeda de Kakadu debido al incremento en los niveles del mar y la intrusión de agua salada.	Australia	Eliot et al., 1999
	1.6-4.1		Amenaza del ecosistema marino por la pérdida de pteropodos aragoníticos	Océano Austral	Orr et al., 2005
2.8	2.5-3.0		Multi-modelo significa el 62% (rango 40-100%) de pérdida de la extensión de hielo Ártico de verano, alto riesgo de extinción del oso polar, morsas, focas; ecosistema Ártico estresado.	Ártico	Symon et al.,
2005; Arzel et al., 2006		2.1-3.9	21-36% de mariposas tendientes a la extinción, >50% del rango perdido por el 83% de 24 especies latitudinalmente restringidas	Australia	Thomas et al., 2004a ; Beaumont y Hughes, 2002
2.8	2.3-4.6	2.1-2.5	Regiones de bosque nublado pierden cientos de metros en extensiones elevadas, extinciones potenciales $\Delta T^{ms}$ 2.1°C para Centroamérica y $\Delta T^{ms}$ 2.5°C para África.	Centroamérica, África Tropical, Indonesia	Still et al., 1999
			Sustancial pérdida de bosques boreales	China	Ni, 2001
2.8	2.1-3.1	3	Pérdida eventual de 9-62% de las especies de mamíferos de las áreas montañosas del Gran Cañón.	E.U.A	McDonald y Brown, 1992
2.8	1.9-3.6	3	38-54% de pérdida en el hábitat de las aves acuáticas en la región de la pradera Photole.	E.U.A	Sorenson et al., 1998; Johnson et al., 2005
2.9		3.2-6.6	50% de la pérdida existente en la tundra solo es compensado por el 5% de eventual ganancia; diversas especies de aves de playa pierden de 5-57% de área de cría, muchas especies del Ártico alto en peligro, varias especies de gansos pierden 5-56% de su área de cría.	Ártico	Zökler y Lysenko, 2000
	1.9-4.1	3-4	Degradación del sistema de Los Alpes	Europa	Theurillat y Guisan, 2001
2.9			La latitud del límite norte de los Bosques del Norte cambia 0.5 grados en el este de Europa, 1.5 grados en Alaska, 2.5 en Chukotka y 4 grados en Groenlandia.	Ártico	Kaplan et al., 2003
2.9	1.6-4.1		Amenaza del ecosistema marino por la pérdida de pteropodos aragoníticos.	Océano Austral	Orr et al., 2005
2.9	1.6-4.1		Reducción del 70% en los corales aragoníticos de aguas frías y profundas.	Cuencas Oceánicas	Cox et al., 2000
2.9		2.1-3.9	21-36% de mariposas tendientes a la extinción, >50% del rango perdido por el 83% de 24 especies latitudinalmente restringidas.	Australia	Thomas et al., 2004a ; Beaumont y Hughes, 2002
2.9	2.6-3.3	2.1-2.8	21-52% (media 52%) de las especies tienden a la extinción.	Global <sup>3</sup>	Thomas et al., 2004a
2.9			Sustancial pérdida de bosques boreales	China	Ni, 2001
3.0			66 de 165 ríos estudiados pierden más del 10% de sus especies de peces.	Global	Xenopoulos et al., 2005
	2.0-5.5		Se predice la extinción de 15-40% de las especies endémicas en la biodiversidad global (caso "bioma con estrecha especificidad")	Global	Malcolm et al., 2006
3.0	1.9-3.5		20% de pérdida del hábitat de las aves migratorias de playa.	Delaware, E.U.A	Najjar et al., 2000
	2.6-4.3	3	Límite bioclimático del 50% de los eucaliptos rebasado.	Australia	Hughes et al., 1996
3.1	2.3-3.7	2 grados Celsius SST	Extinción del ecosistema del arrecife de coral restante (sobre poblado por algas).	Global	Hoegh-Guldberg, 1999
3.1	1.9-4.1	3-4	Degradación del sistema de Los Alpes.	Europa	Theurillat y Guisan, 2001
3.1	2.5-4.0	2	Alto riesgo de extinción del pájaro cenador dorado por la reducción de su hábitat en un 90%.	Australia	Hilbert et al., 2004
3.1	1.8-4.2	3-4	Riesgo de extinción de las especies alpinas.	Europa	Theurillat et al., 1998
3.3	2.0-4.5		Reducción del crecimiento de los corales aragoníticos de agua cálida en un 20-60%; 5% de decrecimiento en la productividad de fitoplancton.	Global	Hoegh-Guldberg, 1999; Raven et al., 2005; Cox et al., 2000
	2.3-3.9	2.6-2.9	Sustancial pérdida de la zona alpina, y su reflejo en la flora y fauna. (e.g., lirio de cielo alpino y zarigüeya pigmea de montaña).	Australia	Pickering et al., 2004

## CUADRO 61. IMPACTOS PROYECTADOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LOS ECOSISTEMAS Y LOS SISTEMAS POBLACIONALES (FINAL)

$\Delta T_g > EP^1$	$\Delta T_g > EP^2$ (rango)	$\Delta T_g > 1990$ (rango)	Impactos	Región	Referencias
	3.0-5.1	3	Probable extinción de 200-300 especies de flora alpina (32-63%)	Nueva Zelanda	Hallo y Mark, 2003
3.3	2.8-3.8	2	Riesgo de extinción del trepador mielero hawaiano como una posible reducción del hábitat en 62-89%.	Hawai	Benning et al., 2002
		5	Límite bioclimático del 73% de los eucaliptos rebasado	Australia	Hughes et al., 1996
3.3		3.7	4-38% de aves tienden a extinguirse.	Europa	Thomas et al., 2004a
3.4			6-22% de pérdida en las costas húmedas; gran pérdida en el hábitat de las aves migratorias, particularmente en E.U.A, Báltico y el Mediterráneo.	Global	Nicholls et al., 1999; Najjar et al., 2000
			62-100% de pérdida de las aves que habitan en los 4 mayores sitios costeros	E.U.A	Galbraith et al., 2002
3.5	2.0-5.5		Se predice la extinción de 15-40% de las especies endémicas en la biodiversidad global (caso "bioma con estrecha especificidad").	Global	Malcolm et al., 2006
3.5	2.3-4.1	2.5-3.5	Pérdida de hábitat del bosque templado de invierno de la mariposa monarca.	México	Villers-Ruiz y Trejo-Vázquez, 1998
3.6	2.6-4.3	3	Límite bioclimático del 50% de los eucaliptos rebasado.	Australia	Hughes et al., 1996
3.6	2.6-3.7		30-40% de 277 mamíferos en 141 parques dramáticamente dañados/extintos; 15-20% dañados.	África	Thriller et al., 2006b
3.6	3.0-3.9		Partes de E.U.A han perdido 30-57% de su riqueza en especies de aves migratorias neotropicales.	E.U.A	Price y Root, 2005
3.7			Pocos ecosistemas pueden adaptarse.	Global	Leemans y Eickhout, 2004
3.7			50% de todas las reservas naturales no pueden cumplir con conservar sus objetivos.	Global	Leemans y Eickhout, 2004
3.7			Contenedores bioclimáticos excedidos llevan eventuales transformaciones del 22% de los ecosistemas globales, la pérdida del 68% de la tundra boscosa, el 44% del bosque de coníferas fresco, el 34% de los matorrales, el 28% de los pastizales/estepas, el 27% de la sabana, el 38% de tundra y el 26% de bosque caducifolio templado. Los ecosistemas variados pierden 7-74% de su extensión.	Global	Leemans y Eickhout, 2004
3.9			4-24% de las plantas críticamente dañadas/extintas, significa especies de vuelta de 63% (rango espacial de 22-90%), significa especies perdidas de 42% (rango espacial de 2.5-86%).	Europa	Thriller et al., 2005b
4.0	3.0-5.1	3	Probable extinción de 200-300 especies de flora alpina (32-63%).	Nueva Zelanda	Hallo y Mark, 2003
>4.0		3.5	38-67% de las ranas, 48-80% de mamíferos, 43-64% de los reptiles y 49-72% de las aves tienden a la extinción Queensland, así como el 85-90% ecosistema viable perdido.	Australia	Thomas et al., 2004a; Williams et al., 2003
>>4.0		5	Límite bioclimático del 73% de los eucaliptos rebasado.	Australia	Hughes et al., 1996
>>4.0		5	57 de las especies endémicas de ranas/mamíferos eventualmente extintas, 8 en riesgo.	Australia	Williams et al., 2003
>>4.0		7	Eventual extinción total de todas las especies endémicas de la selva de Queensland.	Australia	Williams et al., 2003
5.2			62-100% de pérdida de las aves que habitan en los 4 mayores sitios costeros.	E.U.A	Galbraith et al., 2002

Fuente: IPCC (2007)

Pérdidas de la diversidad biológica probablemente den lugar a disminuciones en el suministro de los bienes y servicios con *trade-offs* entre los servicios ecosistémicos (National Research Council, 1999; Carpenter *et al.*, 2005; Duraiappah *et al.*, 2005). Se proyecta que habrá ganancias en los servicios de provisión, en parte, a expensas de otros servicios de regulación y soporte incluyendo recursos genéticos, provisión de hábitat, regulación de clima y escorrentías (IPCC, 2007). Los cambios proyectados también puede aumentar la probabilidad de sorpresas ecológicas que son perjudiciales para el bienestar humano (Burkett *et al.*, 2005; Duraiappah *et al.*, 2005), donde destacan rápidos y abruptos cambios de temperatura y precipitación, con un consecuente aumento de los fenómenos extremos, como inundaciones, incendios y aludes, aumento de la eutrofización, invasión de especies exóticas, o rápido y repentino aumento de enfermedades (Carpenter *et al.*, 2005). De este modo, los impactos esperados relativos a extinción de especies se sintetizan en el Cuadro 62 donde se observa que existe el riesgo de que el 10% de las especies se extingan con un aumento de 1°C, entre el 15 y 40% con el aumento de 2°C, y se verán comprometidas entre el 20 y 50% de las especies ante un aumento de 3°C (Stern, 2007).

## CUADRO 62. EFECTOS ESPERADOS POR EL AUMENTO DE TEMPERATURA EN LA EXTINCIÓN DE ESPECIES

Aumento de temperatura (°C)	% de Especies que pueden extinguirse	Impactos
1	10 %	Blanqueamiento de los corales en Océano Índico, Gran Barrera Coralina y el Caribe Pérdida de hábitats tropicales montañosos
2	15-40%	Extinción del 25-60% de los mamíferos de Sudáfrica Extinción del 15-25 % de las mariposas en Australia Blanqueamiento de corales anualmente, sin recuperación, incide en oferta de alimentos Pérdida de vastas áreas de tundra y bosques
3	20-50%	40% de pérdida de especies endémicas en <i>hot-spots</i> de biodiversidad en África y Queensland Pérdida de áreas costeras debido al aumento en el nivel del mar, particularmente en el Mediterráneo, US y Sureste de Asia Remoción de defensas costeras naturales (por pérdida de barreras coralinas y manglares) Sequía en el Amazonas, lo que puede generar acronecrosis del bosque con la mayor biodiversidad del planeta

Fuente: Elaboración propia con datos de Stern (2007)

## 4. LOS IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA BIODIVERSIDAD EN MÉXICO

México es uno de los países mega-diversos que en conjunto albergan entre el 60 y el 70% de la biodiversidad total del planeta (Mittermeier y Goettsch, 1992 y Conabio, 1998). En efecto, México es considerado como una zona de transición entre la zona neotropical y la neoártica y en donde la diversidad geográfica y climática contribuye a este alto nivel de biodiversidad (Conabio, 1998). El país alberga al menos el 10% de la biodiversidad terrestre consistente en 64,878 especies<sup>40</sup>, y tiene el primer lugar en reptiles, el segundo en mamíferos y el cuarto en anfibios y plantas (Conabio, 1998). Sin embargo, el deterioro de la biodiversidad en México es notable, ya que se han extinguido una gran cantidad de especies de plantas, peces, anfibios, aves y mamíferos. El mayor porcentaje de especies pérdidas en relación a las especies que están extintas en el mundo, es de peces y anfibios, cada una representa el 20% a nivel mundial. Del total de especies extintas, las que se han perdido en México representan el 5.2%. Asimismo, a nivel nacional se han extinto en mayor medida especies de plantas y peces con 31 y 40% respectivamente (Cuadros 63, 64 y 65).

<sup>40</sup> Esta cifra son las especies registradas lo que desde luego subestima el total.



### CUADRO 63. NÚMERO DE ESPECIES DE PLANTAS Y VERTEBRADOS QUE SE HAN EXTINGUIDO DESDE EL AÑO 1600 EN EL MUNDO Y EN MÉXICO

Grupo	Especies extintas	
	Mundo	México
Plantas	595 <sup>1</sup>	15 <sup>2</sup>
Peces	92 <sup>3</sup>	19 <sup>3</sup>
Anfibios	5 <sup>3</sup>	1 <sup>4</sup>
Reptiles	21 <sup>3</sup>	0 <sup>4</sup>
Aves	108 <sup>3</sup>	8 <sup>5</sup>
Mamíferos	89 <sup>3</sup>	4 <sup>5</sup>
<b>Total</b>	<b>910</b>	<b>47</b>

Fuentes: <sup>1</sup> WCMC, 1992; <sup>2</sup> Vovides y Medina, 1994; <sup>3</sup> UICN, 1996; <sup>4</sup> UICN, 1998; <sup>5</sup> Ceballos, 1993

Las pérdidas de plantas se concentran en dos entidades, particularmente las cactáceas en Coahuila y las Valerianeaceae en Veracruz. En cuanto a la distribución de las especies de peces de agua dulce extintos, el 87 % era endémica y los restantes de Norteamérica. Las aves, por su carácter migratorio, se distribuían mayormente en el territorio de Norteamérica, tres especies de mamíferos eran endémicos, uno del mar Caribe y cinco de Norteamérica. En este sentido el impacto del cambio climático incrementará las presiones y el stress sobre la biodiversidad.

### CUADRO 64. ESPECIES DE ALGUNAS FAMILIAS DE PLANTAS EXTINTAS EN MÉXICO

Familia	Especie <sup>1</sup>	Distribución estatal
Cactácea	Gymnocactus aguirreanus	Coahuila
	Gymnocactus mandrágora	Coahuila
	Gymnocactus subterraneus	Coahuila
	Mammillaria carmenae	Tamaulipas
	Mammillaria coahuilensis	Coahuila
	Mammillaria mercadensis	Durango
	Mammillaria solisioides	Puebla
Crassulaceae	Echeveria laui	Oaxaca
	Tacitus bellus	Chihuahua
Selaginellaceae	Selaginella orizabensis	Veracruz
	Valeriana pratensis	Veracruz
	Valeriana robertianifolia	Veracruz, Chiapas
	Valeriana sorbifolia	Veracruz
Verbenaceae	Bouchea prismática	Veracruz

Fuente: Conabio (1998), UICN, (1996). 1.) Vovides y Medina, 1994

## CUADRO 65. ESPECIES DE PECES, ANFIBIOS, AVES Y MAMÍFEROS EXTINTOS EN MÉXICO DESDE 1600

Especie (nombre común)	Situación	Distribución
<b>Peces dulceacuícolas</b>		
<i>Notropis amecae</i> (carpa Ameca)	extinta	endémica
<i>Notropis aulidion</i>	extinta	endémica
<i>Notropis orca</i> (carpa el Paso)	extinta	norteamérica
<i>Notropis saladonis</i>	extinta	endémica
<i>Evarra tlahuacensis</i> (charal)	extinta	endémica
<i>Evarra engelmanni</i> (charal)	extinta	endémica
<i>Evarra bustamantei</i> (charal)	extinta	endémica
<i>Stypodon sygnifer</i>	extinta	endémica
<i>Skiffia francesa</i> (tiro dorado)	extinta	endémica
<i>Characodon garmani</i>	extinta	endémica
<i>Cyprinodon latifasciatus</i> (perrito de Parras)	extinta	endémica
<i>Cyprinodon alvarezi</i>	extinta	endémica
<i>Cyprinodon ceciliae</i>	extinta	endémica
<i>Cyprinodon inmemoriam</i> (cachorrito Trinidad)	extinta	endémica
<i>Cyprinodon longodirsalis</i>	extinta	endémica
<i>Cyprinodon</i> sp	extinta	endémica
<i>Megupsilon aporus</i> (cachorrito)	extinta	endémica
<i>Ameca splendens</i>	extinta	endémica
<i>Priapella bonita</i> (guayacón ojiazul)	extinta	endémica
<i>Scaphyrhynchus platorhynchus</i>	desaparecida <sup>1</sup>	norteamérica
<i>Tiaroga cobitis</i>	desaparecida <sup>2</sup>	endémica
<i>Ptychocheilus lucius</i> (salmón de río)	desaparecida <sup>3</sup>	endémica
<i>Xyrauchen texanus</i>	desaparecida <sup>4</sup>	norteamérica
<i>Hybognathus amarus</i> (carpa Chamizal)	extinta	
<i>Notropis simus</i> (carpa narizona)	extinta	
<i>Scaphirhynchus platorhynchus</i> (esturión)	extinta	
<i>Zoogoneticus tequila</i> (picote tequila)	extinta	
<b>Anfibios</b>		
<i>Rana tlaloci</i>	extinta	endémica
<b>Aves</b>		
<i>Campephilus imperialis</i> (carpintero imperial)	extinta	endémica
<i>Conuropsis carolinensis</i> (periquito)	extinta	norteamérica
<i>Ectopistes migratorius</i> (paloma migratoria)	extinta	norteamérica
<i>Numenius borealis</i> (zarapito boreal)	extinta	norteamérica
<i>Oceanodroma macrodactyla</i> (petrel Isla de Guadalupe)	extinta	endémica
<i>Polyborus lutosus</i> (caracara de Isla Guadalupe)	extinta	endémica
<i>Quiscalus palustris</i> (zanate del Lerma)	extinta	endémica
<i>Zenaida graysoni</i> (paloma de Isla Socorro)	extinta	endémica
<i>Grus americana</i> (grulla blanca)	desaparecida	norteamérica
<i>Gymnogyps californicus</i> (cóndor de California)	desaparecida	norteamérica
<i>Aimophila ruficeps sanctorum</i> (zacatorino rojizo de Todos Santos)	extinta	
<i>Caracara plancus lutosus</i> (caracara, quebrantahuesos de Guadalupe)	extinta	

## CUADRO 65. ESPECIES DE PECES, ANFIBIOS, AVES Y MAMÍFEROS EXTINTOS EN MÉXICO DESDE 1600 (CONTINUACIÓN)

Especie (nombre común)	Situación	Distribución
<i>Carpodacus mexicanus mcgregori</i> (pinzón del Mar de Cortés)	extinta	
<i>Colaptes auratus rufipileus</i> (carpintero de pechera de Guadalupe)	extinta	
<i>Crotophaga major</i> (garrapatero mayor)	extinta	
<i>Crotophaga sulcirostris pallidula</i> (garrapatero pijuy de Los Cabos)	extinta	
<i>Cygnus buccinator</i> (cisne trompetero)	extinta	
<i>Daptrius americanus</i> (caracara come cacao)	extinta	
<i>Micrathene whitneyi graysoni</i> (tecolote enano)	extinta	
<i>Pipilo erythrophthalmus consobrinus</i> (toquí pinto de Guadalupe)	extinta	
<i>Salpinctes obsoletus exsul</i> (chivirín saltaroca de Guadalupe)	extinta	
<i>Sitta canadensis</i> (sita de Guadalupe)	extinta	
<i>Thryomanes bewickii brevicauda</i> (chivirín cola oscura Guadalupe)	extinta	
<b>Mamíferos</b>		
<i>Monachus tropicalis</i> (foca monje)	extinta	mar caribe
<i>Neotoma Anthony</i> (rata cambalachera de Todos Santos)	extinta	endémica
<i>Oryzomys nelsoni</i> (rata arrocera de Tres Marías)	extinta	endémica
<i>Peromiscus pembertoni</i> (ratón de la Isla San Pedro)	extinta	endémica
<i>Bison bison</i> (bisonte)	desaparecida	norteamérica
<i>Cervus elaphus</i> (alce)	desaparecida	norteamérica
<i>Cervus elaphus</i> (alce)	desaparecida	norteamérica
<i>Lutra canadensis</i> (nutria o perro de agua)	desaparecida	norteamérica
<i>Ursus arctos</i> (oso plateado)	desaparecida	norteamérica
<i>Canis lupus baileyi</i> (lobo mexicano, lobo gris)	extinta	
<i>Neotoma bunker</i> (rata cambalachera de Bunker)	extinta	

Fuente: Conabio (1998), Ceballos (1993), y NOM-059-SEMARNAT-2001

En este sentido, los impactos del cambio climático sobre la biodiversidad en México resultan particularmente relevantes. La evidencia disponible sobre los impactos específicos del cambio climático sobre la biodiversidad en México se puede enumerar en los siguientes puntos:

1. El aumento en temperatura y los cambios en los patrones de lluvia incrementará los niveles de desertificación del país, en particular en el norte del territorio (Lozano, 2004) y se incrementará la superficie afectada por sequías (Hernández y Valdez, 2004). Este resultado impactará además al resto del país en la medida en que la mayor parte del territorio nacional es semiárido (Magaña *et al.*, 2004). El conjunto de la biodiversidad tiene una correspondencia con el tipo de cobertura vegetal. El cincuenta por ciento del número de especies se encuentra en las selvas, sin embargo, es en las zonas áridas y semiáridas donde se encuentra la mayor cantidad de especies domésticas y regionales y el mayor número de especies útiles actuales, a pesar de presentar el menor número de especies en total. En este sentido, la preservación de la biodiversidad está estrechamente asociada a los cambios de uso de suelo o incluso al cambio del tipo de vegetación. La población y las actividades económicas han generado presiones en los ecosistemas, cambiando el uso del suelo (MEA 2005 a) impactando negativamente en los ecosistemas degradándolos, desertificándolos y fomentando la introducción de especies exóticas. Asimismo, se generan cambios en el uso del suelo por actividades como construcción de carreteras, puertos y ciudades y descargas de contaminantes.

2. El cambio climático impactará los bosques tanto en el tipo de bosque como en el posible cambio de uso de suelo. Los cambios en la temperatura en zonas templadas (Villers y Trejo, 2004) incidirán más en los bosques de coníferas (pinos y abetos) o bosques latifoliados (como encinos) y algunos pastizales naturales y matorrales que alcanzarán sus límites de tolerancia ecológica con temperaturas más cálidas. Desde este modo, se espera una disminución de la superficie de los bosques de coníferas que serán remplazados por bosques espinosos y bosques sub-tropicales y tropicales (Villers y Trejo, 2004). Estas modificaciones en los bosques se traducirá en modificaciones en la capacidad de captura de carbono (de Jong, Masera y Hernández-Tejada, 2004), impactará a otros servicios ambientales e incidirá en el número de incendios (Ibarrarán, 2007). Existe además evidencia de que pueden perderse algunos bosques tropicales (Villers y Trejo, 2004).
3. Los impactos en la biodiversidad están estrechamente relacionados con los cambios en los bosques; en particular los impactos sobre los bosques templados de coníferas y encinos, matorral xerófilo, bosque mesófilo de montaña, vegetación acuática y subacuática y el pastizal (Arriaga y Gómez, 2004). Por ejemplo, los bosques de coníferas se consideran entre los más ricos en biodiversidad (Rzedowski, 1998). De este modo, un cambio de la superficie de bosques, incluso sólo su substitución por otro tipo de bosques, implica un cambio en la distribución de las especies que difícilmente se adaptarán a cambios tan acelerados (Arriaga y Gómez, 2004). Diversos estudios muestran que puede existir una destrucción de fauna de hasta 40% por el desequilibrio ecológico (Peterson *et al.*, 2002, 1999, 2001).
4. Los estudios a nivel mundial, sintetizados en el Cuadro 66, revelan que los principales eventos ante el cambio climático de los ecosistemas marinos están relacionados a cambios en la distribución poblacional y en la población, propagación de especies, patrones de migración, interacciones tróficas y fenología regional como respuestas a los cambios regionales de temperatura y a la salinización. Así, el incremento del 1 a 3°C para 2080 tendrá consecuencias para algunas especies como las tortugas caguama, el manatí y algunas especies de cocodrilos (IPCC, 2007). Aunado a la biodiversidad terrestre, México dispone de una diversidad de la vida marina muy amplia debido a diversos factores tales como 1) su fisiografía atendiendo a la extensión de sus costas 11,592 km, al mar territorial que abarca 231,813 km<sup>2</sup> y a la zona económica exclusiva de 3, 149,920 km<sup>2</sup>; 2) a la gran variedad de ambientes costeros derivados de la interacción de procesos geológicos, oceanográficos y atmosféricos; y 3) a que posee 1, 560,000 ha de cuerpos de agua estuarinos y más de 3,000 rasgos geomorfológicos entre los que destacan islas, arrecifes, islotes, bajos y bancos (INEGI, 1994). Así, en México se han encontrado 152 especies de corales pétreos, de los cuales 64% se encuentran en las aguas del Atlántico, y 28% en el Pacífico. Sin embargo, se ha identificado que el 46.2% de la costa del Golfo de México, principalmente del centro hacia el sur, es susceptible al ascenso en el nivel del mar en regiones específicas como son las costas de playas bajas arenosas, incluyendo las llanuras costeras y planicies deltáicas asociadas (Ortiz y Méndez, 1999), en el Golfo, a un aumento en la temperatura de 1.5°C y un incremento en el nivel del mar de 20 cm para el año 2025 (Ortiz y Méndez, 2000).

Los impactos para los ecosistemas marinos (destrucción de hábitats costeros críticos) dependerán de la velocidad con que ocurra el cambio climático; para el Pacífico mexicano el escenario del IPCC (2001) indica que el incremento global de 1.2 mm por año es menor a la adaptación que han tenido los ecosistemas ante variaciones naturales como "El Niño"; sin embargo para el Golfo de México se han identificado riesgos para ciertas regiones (Ortiz y Meléndez, 2000 y Lluch-Cota, 2004).

## CUADRO 66. CAMBIOS EN LOS ECOSISTEMAS MARINOS Y PESQUERÍAS ADMINISTRADAS

Principales cambios	Vínculo del clima	Ubicación	Referencias
Productividad pelágica/ Abundancia de zooplancton / Ensamblajes de plancton	Respuestas biológicas a los cambios regionales de temperatura, estratificación, flujos de mar y otros cambios hidro-climáticos.	Atlántico Norte	Fromentin y Planque, 1996; Reid <i>et al.</i> , 1998; Edwards <i>et al.</i> , 2002; Beaugrand <i>et al.</i> , 2003; Johns <i>et al.</i> , 2003; Richardson y Schoeman, 2004
		Pacífico Norte	Roemmich y McGowan, 1995; Walther <i>et al.</i> , 2002; Lavaniegos y Ohman, 2003; Chiba y Tadokoro, 2006
		Atlántico Sur	Verheye <i>et al.</i> , 1998
		Océano Antártico	Walther <i>et al.</i> , 2002; Atkinson <i>et al.</i> , 2004
Fenología Pelágica	Principio de aparición estacional debido al incremento de temperatura y falta de adecuación trófica.	Mar del Norte	Edwards y Richardson, 2004; Greve, 2004
Biogeografía Pelágica	Movimiento norte de las comunidades de plancton debido al calentamiento general.	Atlántico Norte Oriental	Beaugrand <i>et al.</i> , 2002b
	Movimiento boreal al sur del plancton en la zona occidental del Atlántico Norte debido a menor salinidad.	Atlántico Norte Occidental	Johns <i>et al.</i> , 2001
Cordillera Montañosa/ Comunidades intermareales.	Cambios de comunidades debido a cambios de temperatura.	Islas Británicas	Hawkins <i>et al.</i> , 2003; Southward <i>et al.</i> , 2005
		Pacífico Norte	Sagarin <i>et al.</i> , 1999
Bosques Kelp / Macroalgas	Efectos sobre las comunidades y propagación de especies en aguas cálidas debido al incremento de temperaturas.	Pacífico Norte	Holbrook <i>et al.</i> , 1997
		Mediterráneo	Walther <i>et al.</i> , 2002
Especies invasivas y patógenas	Cambios del rango geográfico debido al incremento de temperatura.	Atlántico Norte	Harvell <i>et al.</i> , 1999; Walther <i>et al.</i> , 2002; McCallum <i>et al.</i> , 2003
Población de peces y éxito de renovación	Cambios en la población éxito de renovación, interacciones tróficas y pautas migratorias relacionadas con el cambio ambiental regional.	Islas Británicas	Attrill y Power, 2002
		Pacífico Norte	McGowan <i>et al.</i> , 1998; Chavez <i>et al.</i> , 2003
		Atlántico Norte	Walther <i>et al.</i> , 2002; Beaugrand y Reid, 2003; Beaugrand <i>et al.</i> , 2003; Brander <i>et al.</i> , 2003; Drinkwater <i>et al.</i> , 2003
		Mar de Barents	Stenseth <i>et al.</i> , 2002; Walther <i>et al.</i> , 2002
		Mediterráneo	Walther <i>et al.</i> , 2002
		Mar de Bering	Grebmeier <i>et al.</i> , 2006

## CUADRO 66. CAMBIOS EN LOS ECOSISTEMAS MARINOS Y PESQUERÍAS ADMINISTRADAS (CONTINUACIÓN)

Principales cambios	Vínculo del clima	Ubicación	Referencias
Biogeografía de peces	Área geográfica relacionada con los cambios de temperatura	Atlántico Noreste (NE)	Brander <i>et al.</i> , 2003; Beare <i>et al.</i> , 2004; Genner <i>et al.</i> , 2004; Perry <i>et al.</i> , 2005
		Atlántico Noroeste (NO)	Rose y O'Driscoll, 2002
		Mar de Bering	Grebmeier <i>et al.</i> , 2006
Aves y mamíferos marinos	Cambios en la población, patrones de migración, interacciones tróficas y fenología regional relacionadas con cambios ambientales; pérdida de hábitat de hielo en relación con el calentamiento.	Atlántico Norte	Walther <i>et al.</i> , 2002; Drinkwater <i>et al.</i> , 2003; Frederiksen <i>et al.</i> , 2004
		Pacífico Norte	McGowan <i>et al.</i> , 1998; Hughes, 2000
		Océano Antártico	Barbraud y Weimerskirch, 2001; Walther <i>et al.</i> , 2002; Weimerskirch <i>et al.</i> , 2003; Forcada <i>et al.</i> , 2006; Stirling y Parkinson, 2006
Biodiversidad marina	Respuesta regional al calentamiento general.	Atlántico Norte	Beaugrand <i>et al.</i> , 2002a

Fuente: IPCC (2007)

Así mismo se verá afectados los ecosistemas costeros por la salinización del suelo (Sanjurjo, 2006, Tejeda y Rodríguez, 2006). En efecto, las consecuencias del aumento en el nivel del mar son la erosión, la inundación y la salinización de tierras, de aguas superficiales y del manto freático cercano; que a su vez influyen en las características estructurales y en la distribución espacial de los ecosistemas asociados (Pannier, 1992), y por otro lado se altera la vocación del uso del suelo, con efectos directos sobre la economía regional (Ortiz y Méndez, 2000). El incremento en el nivel del mar en las costas de México propiciará la vulnerabilidad de algunas regiones a las inundaciones, pues se disminuye la capacidad de descarga de los cauces. Son previsible mayores riesgos, en especial en las desembocaduras del río Grijalva en Tabasco, y de los ríos de Coatzacoalcos y Pánuco, en Veracruz (Ortiz y Méndez, 2000).

Existe además un impacto importante en los arrecifes y manglares que pueden incidir en la pesca (Sanjurjo y Welsh, 2005); además el cambio climático global es una fuerte presión sobre los sistemas coralinos (IPCC, 2007). En efecto, el sobrecalentamiento del agua del mar, aunque también la contaminación y la exposición al aire, producen el llamado "blanqueamiento del coral", resultado de la pérdida de las algas (zooxantelas) que viven como simbiosis en el interior de los pólipos coralinos. Ello hace que pierdan su coloración natural y adquieran un aspecto blanquecino. Aunque los corales pueden recuperarse en caso que el estrés no sea prolongado, en algunas ocasiones causa su debilitamiento, enfermedad y muerte. En México, en el periodo 1990-2003, el 95% de los reportes de blanqueamiento de coral se registraron entre 1997 y 2000, siendo 1999 el año con mayor número de registros. El 61% de los reportes en el mismo periodo provienen de los arrecifes del Caribe, 34% del Pacífico y tan sólo 4% de los arrecifes del Golfo. La temporada 1997-1998 (asociada con el fenómeno de El Niño) registró un evento masivo de blanqueamiento en el mundo. En este último año, 71% de los reportes mostraron daños severos en los arrecifes. El 39% de los arrecifes mexicanos se encuentran en alguna condición de riesgo (Spalding *et al.*, 2001) destacando aquellos de la costa del estado de Veracruz (Tuxpan y el Sistema Arrecifal Veracruzano), los cercanos a los centros turísticos de Quintana Roo (especialmente los de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc) y los de La Paz, en Baja California Sur y Cayo Arcas en Campeche, son los más amenazados. Entre los arrecifes con grado de amenaza medio, están los de Cabo Pulmo en la costa oriental de Baja California Sur, la zona occidental de Arrecife Alacranes y Bajo Sisal en la costa yucateca, los arrecifes de la costa occidental de Cozumel y, en el sur de Quintana Roo, los cercanos a Xcalak. Con el escenario climático de un aumento de 1 a 3°C para finales de siglo los arrecifes coralinos y manglares estarán amenazados con consecuencias de peligro de extinción de un gran número de especies (Cahoon y Hensel, 2002).

5. Las características de la geografía mexicana sugiere además impactos diferenciados de modo que las montañas ofrecen más opciones ante cambios climáticos que las tierras planas (Peterson, 2003b); asimismo, se observa que los efectos son más sutiles en altitudes medias de México (Peterson, 2003b). A nivel global, los ecosistemas tienen efectos asociados a incrementos en la productividad de la biomasa, disminución en la composición de la comunidad de algas, cambio de especies, cambios en la fenología como anticipación del florecimiento de algas y anticipación en la migración de peces.
6. En las regiones áridas, es previsible una mayor frecuencia de sequías más intensas. Deberá prestarse especial atención a las cuencas de los ríos en la región norte, en especial la del río Bravo.
7. El cambio climático incidirá en la calidad del agua, en particular en lagos y otros cuerpos de agua superficiales (IMTA 2007). Así, Mulholland *et al.*, (1997) muestra que los efectos del cambio climático en el agua dulce en la región del sureste de Estados Unidos y las costas del Golfo de México incluyen:
  - a. Aumento general en las tasas de producción primaria, en la descomposición de la materia orgánica y el ciclo de nutrientes, como resultado de temperaturas más altas y mayores temporadas de crecimiento.
  - b. Reducción en la calidad del agua y en el hábitat adecuado en el verano debido a la disminución de los flujos basales y la intensificación del oxígeno disuelto por la temperatura comprimido en muchos ríos y reservas.
  - c. Reducción de almacenamiento de materia orgánica y pérdida de organismos durante eventos intensos de inundación en algunos arroyos y humedales.
  - d. Períodos más cortos de inundación de los humedales ribereños y de una mayor sequía de los suelos de humedales, especialmente en el norte y las zonas interiores.
  - e. Expansión de los humedales en las costas de Florida y México, pero aumento de la eutrofización de los lagos de la Florida como resultado de mayores descargas de las zonas urbanas y las zonas agrícolas.
  - f. Cambios en la tasa de drenaje de los estuarios que modifiquen sus regímenes de salinidad, estratificación y la calidad del agua, así como influir en la productividad en el Golfo de México.

El Cuadro 67 sintetiza los resultados de estudios de los efectos del cambio climático en diferentes ecosistemas en México. Estos resultados no son exhaustivos, sin embargo, se observa que los efectos son diversos y de diferentes magnitudes, dependiendo del ecosistema y de la región del país.

## CUADRO 67. EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS ECOSISTEMAS EN MÉXICO

Ecosistema	Efecto	Región	Referencia
	Aumento de 1.3 a 3 grados: 2-18% de los mamíferos, 2-8% de las aves y 1-11% de las mariposas tienden a la extinción		Thomas <i>et al.</i> , 2004a, Peterson, <i>et al.</i> , 2002
	Aumento de 2.2 a 4 grados: 2-20% de mamíferos, 3-8% de aves y 3-15% de mariposas tienden a la extinción		Erasmus <i>et al.</i> , 2002
Zonas áridas	Desertificación, por cambio en los patrones de lluvia y aumento de temperatura	Norte del país	Lozano, 2004
Zonas áridas	Sequía extrema	Baja California, Sonora, Costas de Oaxaca y Guerrero, Michoacán, Campeche y Yucatán	Magaña <i>et al.</i> , 2004
Bosques	Disminución de la superficie de bosques de coníferas. Pérdida de bosques tropicales		Villers y Trejo, 2004
Bosques	destrucción de fauna de hasta 40 % por el desequilibrio ecológico		Peterson <i>et al.</i> , 2002, 1999, 2001
Costeros	46.2% de la costa es susceptible al ascenso en el nivel del mar	Golfo de México	Ortiz y Méndez, 1999
Costeros	Aumento en el nivel del mar incide en la erosión, la inundación y la salinización de tierras, de aguas superficiales y del manto freático		Ortiz y Méndez, 2000
Costeros	Salinización del suelo		Sanjurjo 2006, Tejeda y Rodríguez 2006
Marinos	Impactos potenciales para pesquerías como el camarón	Golfo de México	Park, 1991
Marinos	Con un aumento de 1 a 3°C para el 2080, los arrecifes coralinos y manglares estarán amenazados con consecuencias de peligro de extinción de un gran número de especies		Cahoon y Hensel, 2002
Ríos	Inundaciones	Desembocaduras del río Grijalva en Tabasco, y de los ríos de Coatzacoalcos y Pánuco, en Veracruz	Ortiz y Méndez, 2000
Agua dulce	Aumento general en las tasas de producción primaria, en la descomposición de la materia orgánica y el ciclo de nutrientes; reducción en la calidad del agua y en el hábitat adecuado en el verano; reducción de almacenamiento de materia orgánica y pérdida de organismos; períodos más cortos de inundación de los humedales ribereños; y cambios en la tasa de drenaje de los estuarios	Tierra adentro del Golfo de México	Mulholland <i>et al.</i> , 1997

Fuente: Elaboración propia con datos de las fuentes



## 5. EL CAMBIO CLIMÁTICO Y LOS COSTOS ECONÓMICOS EN LA BIODIVERSIDAD EN MÉXICO

La estimación de los costos económicos en la biodiversidad asociados al cambio climático requiere, desde luego, una valoración económica que está sujeta a diversas limitaciones y críticas. Por desgracia la información disponible para México limita las opciones de valoración. En este caso, se optó por valorar económica y exclusivamente los servicios ecosistémicos que proporciona la biodiversidad en términos de bioprospección, conservación de especies (en general) y fauna cinegética, turismo, valor estético de bosques, y captura de carbono (Figura 15). Existen, desde luego, otros servicios que deberían considerarse pero que la información es aun parcial e incompleta.

Figura 15. Componentes de la valoración económica



### 5.1. BIOPROSPECCIÓN

La bioprospección representa la investigación y exploración selectiva de la diversidad biológica para identificar recursos genéticos y bioquímicos que sean actual o potencialmente valiosos desde el punto de vista comercial (Loa et al., 1996 y Torres, 2005), ello es considerado un valor de opción de la biodiversidad. Por desgracia, las estimaciones sobre este tema muestran aún una gran incertidumbre. Por ejemplo, por un lado, Newman y Laird (1999) estiman que para Estados Unidos de Norteamérica el 42% de las ventas de farmacéuticos se basan en productos naturales biológicos o son derivados naturales que para 1991 tuvieron un valor de 17.5 mil millones de dólares. Sin embargo, Laird y Kate (2006) argumentan que estas estimaciones en el caso de Costa Rica sugieren valores más reducidos (Simpson et al., 1994; Pagliola, 2006 y Aylward et al., 1993).

Una estimación de las posibilidades de bioprospección incluyendo el número potencial de especies de plantas medicinales en México se presenta en el Cuadro 68. Existe además un potencial adicional considerando que el total de especies de plantas vasculares en México es de aproximadamente 23,522 aunque se estima podría llegar a 31,000<sup>41</sup>. De este modo, se estima que el servicio de la biodiversidad (solo considerando bioprospección) se concentra en 35 especies amenazadas, 3,500 a 4,000 que son empleadas por la población mexicana, y alrededor de 250 validadas clínicamente (1% de las especies actualmente conocidas<sup>42</sup>) que pueden tener un uso potencial para el desarrollo de sustancias activas aplicables a distintos procesos económicos. Ello contrasta con el registro de alrededor de 4,000 especies con uso medicinal (Torres, 2006) que se requiere aún validar donde entre el 37.5 al 44.1% de esas plantas provienen de bosques de pino y encino y el resto del bosque tropical. De este modo, de las diez especies más consumidas a nivel nacional, siete regularmente se llegan a encontrar en los bosques templados (Cordero y Morales, 1998).

## CUADRO 68. ESTIMACIÓN DE ESPECIES MEDICINALES EN MÉXICO

Especies medicinales	Número de especies
Identificadas y registradas	4,000
Validadas farmacológicamente y clínicamente	250
Empleadas por la población mexicana	3,500-4,000
Utilizadas regularmente (sin procesar)	1,500
Utilizadas intensivamente (sin procesar, mezcladas o procesadas)	250
Silvestres que se colectan (90% aproximadamente)	3,600
Cultivadas en huerto familiar o de manera comercial	370
Amenazadas	35

Fuente: Huerta, 1997 y Torres, 2005

De este modo, una estimación del valor potencial de especies para bioprospección en México puede hacerse considerando que una de cada 333 plantas “descubiertas” con uso medicinal tendrá un valor para la industria farmacéutica. Utilizando el modelo de Pearce y Puroshothaman (1992) puede entonces estimarse el valor de opción como una función del número de especies en riesgo, el número de medicamentos basados en especies de plantas y el número de hectáreas que probablemente contengan plantas medicinales. La fórmula que expresa el valor por hectárea se representa por:

$$(20) \quad V_p(L) = [N \cdot p \cdot r \cdot a \cdot V/n] / H$$

Donde  $V_p(L)$  es al valor farmacéutico de hectárea por año,  $N$  es el número de especies de plantas en el bosque,  $p$  es la probabilidad de que sea exitosa,  $r$  es la tasa de regalías,  $a$  es la tasa de apropiación,  $V/n$  el valor anual de los fármacos desarrollados, y  $H$  es el área del bosque. Adger, *et al.*, (1995) aplicó este modelo para México asumiendo que existen alrededor de 5 mil especies de plantas en los bosques tropicales (bosques con potencial de plantas medicinales) y que existe una probabilidad de identificar una especie con valor medicinal de entre 0.0001 a 0.001, con una media de 0.005. Además se consideraron tasas de regalías en función de las características de la protección de patentes en el país (5%) y tasas de apropiación (capacidad institucional de desarrollar la droga) variables. De este modo, Adger *et al.* (1995) obtuvo un valor de los bosques de entre 26 y 4,646 millones de dólares por año dependiendo del grado de biodiversidad (Cuadro 69).

<sup>41</sup> Dato reportado en CONABIO, 2006.

<sup>42</sup> Estimación usual en la valoración de potencial farmacológico Pearce y Puroshothaman (1992).

Como una aproximación del valor de la biodiversidad asociada a la bioprospección de bosques y selvas y usando el valor promedio de Adger *et al.* (1995) se tiene entonces que los bosques para el 2000 tienen un valor de cuasi-opción de 416.8 millones de dólares. Debe reconocerse que estas estimaciones tienen un alto nivel de incertidumbre ya que por ejemplo las estimaciones del valor de bioprospección por hectárea son muy variadas. Así, Howrsad (1995) estima en 0.20 dólares la hectárea, Kumari (1995a) en 695, Ruitenbeck (1992) en 7 dólares por hectárea, Fearnside (1997) y Mendelsohn (1994) en 20 dólares; el promedio de Adger *et al.* (1995) es de 6.4 dólares por hectárea, con una gama de valores que van de 1 a 90 dólares.

## CUADRO 69. VALORES FARMACÉUTICOS DE CUASI-OPCIÓN DE LOS BOSQUES MEXICANOS

Grado de biodiversidad	Valor para el bosque húmedo tropical		Valor de todos los bosques Millones de dólares por año
	(Dólares / ha / año)	Millones de dólares por año	
Bajo	1	5	26
Medio	6	66	332
Alto	90	875	4,646

**Supuestos:** 5 mil especies es el menor número estimado de especies en bosques húmedos tropicales en México, y este valor mínimo se asignó a todos los tipos de bosques. Área forestal: 9.7 millones ha para los bosques húmedos tropicales; 51.5 millones ha para todos los bosques. La probabilidad de identificar una especie de valor es de 0.0005, y la tasa de regalía 0.05.

Límite inferior: tasa de apropiación = 0.1

valor de la droga = \$ 0.39 000 millones/año

Límite medio: tasa de apropiación = 0.5

valor de la droga = \$ 1 000 millones/año

Límite superior: tasa de apropiación = 1.0

valor de la droga = \$ 7 000 millones/año

Fuente: Adger *et al.*, 1995.

## 5.2. CONSERVACIÓN DE ESPECIES

La explotación comercial de especies y fauna silvestre incluye tanto las actividades cinegéticas, los ranchos cinegéticos o criaderos extensivos, la explotación de mascotas y el aprovechamiento de aves canoras y de ornato se realiza, generalmente, dentro de las Unidades de Manejo para la Conservación de la Vida Silvestre (UMA). Así, una valoración económica preliminar de estos rubros permite entonces identificar un valor general para algunas de estas especies. El número de cazadores registrados en México se estima en alrededor de 18 mil mexicanos y 12 mil extranjeros, y se estima que la cacería ilegal y de subsistencia incluye dos o tres veces ese número (Torres, 2005). La actividad cinegética formal se concentra en pocas especies que se reduce a algunos mamíferos y ciertas aves, destacando los casos del venado cola blanca, borrego cimarrón, venado bura, gato montés, coyote, diversas especies de conejos y liebres, así como varias especies de patos, gansos y palomas, destacando el pato golondrino, el pato boludo, la cerceta de alas azules y de alas verdes, la cerceta canela, el pato bocón, el pato pinto, el tepalcate, el ganso frente blanca, ganso canadiense, ganso nevado, branta negra, paloma de alas blancas, huilota y codornices (INE, 2000). Por su parte, en la cacería informal destacan especies como jabalí, armadillo, tepezcuintle, rana, tortuga, temazate, mono, iguana, conejo, tapir, hoco, faisán, tlacuache, coatí, martucha, zorrillo y diversas aves, entre otras (INE, 2000). Asimismo, de acuerdo con el calendario de captura, transporte y aprovechamiento de aves canoras y de ornato solo se permite la venta de alrededor de 72 especies de aves y se excluye o prohíbe la venta de aves rapaces diurnas y nocturnas, la de loros y guacamayas, así como la de otras especies amenazadas (INE, 2000).

Los precios definidos por presa de caza se definen por ley reflejando fundamentalmente criterios históricos y se incluyen en el Cuadro 70. De 1997 al 2000 se registro un aumento promedio de 2,966% en términos reales del derecho de aprovechamiento extractivo por ejemplar donde el mayor aumento en tasa de crecimiento lo registro la Perdiz y, en términos monetarios, el Borrego Cimarrón con un aumento de 274,392 pesos en términos nominales. Para el 2008 las tarifas siguen aumentando en términos nominales, pero en términos reales sufrieron una disminución.

Destaca sin embargo que al comparar estos valores con aquellos referidos internacionalmente (Cuadro 71) se observa que los valores en México son substancialmente inferiores. Por ejemplo el jabalí se paga en México en 236 dólares, y el promedio internacional es de 582 dólares, 40% más bajo. El promedio de las especies de venados en México es de 1,727 dólares, 57% inferior al promedio internacional. En todo caso se estima que los ingresos por temporada cinegética son en promedio de 9.4 millones de dólares<sup>43</sup> durante las 21 temporadas previas a 1993 y un promedio de 1.1 millones de dólares para las temporadas de 1993 a 1997 (Pérez-Gil S., R. *et al.*, 1996). De este modo, se estima que la cacería deportiva generó alrededor de 127.5 millones de pesos en 1995 para el conjunto de los 120 organizadores cinegéticos registrados, hoteles, restaurantes, guías y armeros, que se suman a los casi 10.0 millones de pesos que correspondieron a pagos por derechos de caza (INE, 2000).

## CUADRO 70. PRECIOS OFICIALES POR PERMISO DE CACERÍA DE DIFERENTES ESPECIES (PESOS MEXICANOS, BASE 2008)

Especie	1997	2000	2008	2008 en dólares
Borrego cimarrón	45,195	421,259	334,092	31,818
Venado bura en Sonora o cola blanca texano	702	42,718	32,136	3,061
Venado bura en el resto del país	527	12,482	9,899	943
Venado cola blanca en el resto del país o temazate	615	12,482	12,374	1,178
Puma	1,205	15,602	10,000	952
Gato montés	843	3,120	2,475	236
Faisán de collar	421	7,802	6,187	589
Pavo ocelado	402	4,680	3,712	354
Guajolote silvestre	421	4,680	3,712	354
Jabalí labios blancos	421	3,120	2,475	236
Perdiz o Tinamú	200	24,207	18,210	1,734
Patos, cercetas y gansos	421	24,207	18,210	1,734
Palomas	421	24,207	18,210	1,734
Jabalí de collar	105	3,120	2,000	190
Zorra gris	105	4,680	3,712	354
Otras aves de acuerdo al calendario cinegético	211			

<sup>43</sup> Sólo se consideraron los cazadores mexicanos en la cacería ejercida con permiso.

## CUADRO 70. PRECIOS OFICIALES POR PERMISO DE CACERÍA DE DIFERENTES ESPECIES (PESOS MEXICANOS, BASE 2008) (CONTINUACIÓN)

Especie	1997	2000	2008	2008 en dólares
Otros pequeños mamíferos de acuerdo al calendario cinegético	211			
Borrego audat	632	370	294	28
Jabalí africano o warthog	632			31,818

Fuente: Diario Oficial de la Federación, 29/DIC/1997, Ley Federal de Derechos (2001 y 2008)

## CUADRO 71. TARIFAS INTERNACIONALES DE CAZA DE ABATIMIENTO POR EJEMPLAR CAPTURADO, 2008

Especie	Precio en Dólares por ejemplar abatido	País
Jabalí	704	Turquía
	786	Croacia
	723	Austria
	115	Argentina
	<b>582</b>	<b>Promedio</b>
Ciervo-Venado	4,000	Canadá
	3,800	Australia
	3,910	Hungría
	330	Argentina
	<b>3,010</b>	<b>Promedio</b>
Pato	2	Argentina
Faisán	24	Serbia
Perdiz	9	Argentina

Fuente: <http://www.safariinternational.com>, abatimiento de especies de caza mayor y menor

Para la temporada cinegética 1999-2000 se expidieron 51,347 permisos para caza deportiva que generaron ingresos por más de 14.6 millones de pesos. Se emitió un total de 26,117 permisos para la caza de aves, 17,591 para mamíferos y 7,639 cintillos de cobro (especies de caza mayor). Los estados que expidieron el mayor número de permisos de aves fueron Jalisco, 4,236; Baja California, 3,985; Sonora, 3,736 y Nuevo León con 757 (Semarnat, 2002). Se estima que en la región norte del país (Baja California, Sonora, Chihuahua, Nuevo León y Tamaulipas) la cacería deportiva genera un total de 666 millones de pesos, que puede ser separado en 526 millones de ingreso directo, 19 millones de ingreso indirecto y 121 millones de ingreso inducido (Guajardo y Martínez, 2004). Estimaciones recientes calculan beneficios generados de la actividad cinegética de alrededor de 388 millones de pesos (Ávila-Foucat, 2006).

Por otra parte, el aprovechamiento de aves canoras y de ornato beneficia económicamente a 563 capturadores registrados, generalmente campesinos, a transportistas y a vendedores ambulantes (Torres, 2005). Esta actividad generó cerca de 200 mil pesos por concepto de pagos de permisos de captura, transporte y diferentes tipos de venta entre 1994 y 1995. Por su parte, la venta de aves se estima fue de 10 millones de pesos (INE, 2000). Datos recientes calculan, además, que el aprovechamiento de aves canoras y de ornato es de alrededor de 4.6 millones de pesos (Ávila-Foucat, 2006).

El valor total de las exportaciones de vertebrados silvestres de México, durante los años de 1982 a 1992, ascendió a la cantidad de 108 mil millones de pesos. Los principales destinos fueron Estados Unidos de Norteamérica con 61% (66 mil millones de pesos), Japón con 9% (9 mil millones de pesos) y Canadá con 6.5% (7 mil millones de pesos) (Pérez-Gil S. R. *et al.*, 1996). Para el año 2006 las exportaciones de animales vertebrados<sup>44</sup> silvestres fueron de 140 mil dólares, y para el 2007 fueron de 476 mil dólares (SE, 2008). Asimismo existe un alto tráfico ilegal de especies, difícil de cuantificar por la gran franja fronteriza y la enorme diversidad de especies demandadas (Conabio, 1998). En el Cuadro 72 se presentan las especies con mayor demanda por el comercio ilegal y su cotización en el mercado internacional. La especie con el mayor valor comercial es el borrego cimarrón pero es importante destacar la amplia diferencia que existen en los precios del mercado local en relación a los del mercado internacional.

## CUADRO 72. ESPECIES CON MAYOR DEMANDA EN EL COMERCIO ILEGAL

Grupo Taxonómico	Nombre Común	Nombre Científico	Cotización Mercado Local (pesos)	Cotización Mercado Internacional (USD)
Arácnidos	Tarántula patas rojas	Brachyephma smithi	40	35
Aves	Cotorra cabeza roja	Amazona viridigenalis	400	1,500
	Gavilán cola roja (aguililla, halcón)	Buteo jamaicensis	5,000	0
	Guacamaya roja	Ara macao	6,000	5,000
	Guacamaya verde	Ara militaris	3,000	4,000
	Halcón peregrino	Falco peregrinus	1,000	1,500
	Loro	Amazona Ochrocephala	300	1,500
	Loro cabeza amarilla	Amazona oratrix	1,000	3,000
	Tucán pecho amarillo	Ramphastos sulfuratus	500	6,000
Mamíferos	Borrego cimarrón	Ovis canadensis	400,000	50,000
	Mono araña	Ateles geoffroyi	2,500	1,500
	Mono aullador	Alouata palliata	2,500	1,500
Reptiles	Boa	Boa constrictor	400	200
Cactáceas	Cactáceas	-	100-200	2-2000
Orquídeas	Orquídeas	-	30-300	10,000

Fuente: Semarnat (2007)

Los valores anualizados de la biodiversidad derivados de la conservación de especies se sintetizan en el Cuadro 73. De esta forma, se obtiene un valor aproximado de 397.4 millones de pesos corrientes, en donde el que aporta más es la actividad cinegética, debido también a la actividad adicional que genera.

<sup>44</sup> Borrego cimarrón, berrendo, oso, lobo, castor, puma, jaguar, ocelote, margay, gato de monte o tapir, venado rojo (*Cervus elaphus*), gamo (Dama), elefantes y leones marinos, tortugas terrestres, psitaciformes (incluidos los loros, guacamayos, cacatúas y demás papagayos), aves canoras: flamencos; quetzales, guan cornudo y pato real.

### CUADRO 73. VALORES ECONÓMICOS DIRECTOS DE EXPLOTACIÓN DE ESPECIES

Concepto	Millones de Pesos	Periodo
Actividad Cinegética	388.1	2006
Aprovechamiento de aves canoras y de ornato	4.6	2006
Exportación de vertebrados	4.7	2007
<b>Total</b>	<b>397.4</b>	

### 5.3 VALOR DEL TURISMO ASOCIADO A LA BIODIVERSIDAD

El valor del turismo total representa alrededor de 7.7% del PIB, muestra una tasa de crecimiento promedio anual del 2.7% en términos reales en años recientes (SECTUR, 2007) y emplea al 4.3% de la población económicamente activa del país. A pesar de su crecimiento, no existen estimaciones históricas sobre el ecoturismo en México y no obstante su enorme potencial es aún muy incipiente (Conabio, 2006). Los ejemplos más destacados son los de las visitas a la Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca, al avistamiento de las ballenas en la Reserva de la Biosfera de El Vizcaíno, a los arrecifes de coral en los parques nacionales de Puerto Morelos, Cozumel, Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc, a la Reserva de la Biosfera de Los Tuxtlas en Veracruz, a los parques nacionales de Huatulco, Sierra de Juárez, San Nicolás Totolapan y Ajusco, entre otros. Adger *et al.*, (1995), estimaron un potencial de visitas u áreas ecoturísticas de 20,000 visitas al año con un promedio de estancia de 10 días y un gasto por día de US\$70.00 diarios. Por su parte, el ecoturismo multipropósito es más amplio y variado, los mismos autores estimaron que el número total de visitantes a parques nacionales y reservas de la biósfera oscila entre 5.19 a 6.13 millones de visitantes al año, con un excedente del consumidor de aproximadamente US\$3.20 (Torres, 2004). De este modo, suponiendo que las tendencias en el número de visitantes al país y su proporción ecoturística se mantiene entonces Adger *et al.*, (1995) estiman que el número potencial de ecoturistas es de 30,200, con un gasto promedio entre US \$20.60 a 22.10 diarios. Suponiendo además un número similar de ecoturistas de multipropósito al de Adger *et al.*, (1995) entonces el beneficio potencial de los servicios de ecoturismo que pueden obtenerse de los bosques de México varía entre US \$30.6 a 33.6 millones al año.

La valoración de los servicios de ecoturismo para México es muy variada. Una aproximación sugiere que los ingresos por turismo asociado a la biodiversidad (observación de ballenas, flamencos y tortugas) alcanzan los 5.3 millones de pesos constantes (CONABIO, 1998), y que corresponde aproximadamente al 5% del turismo internacional receptivo (Cuadro 74).

## CUADRO 74. INGRESOS POR USO TURÍSTICOS DE LA BIODIVERSIDAD: ECOTURISMO EN ANP Y UNIDADES DE PRODUCCIÓN (1995)

Elementos de demanda y oferta	Concepto de ingresos	Monto de ingresos (millones de pesos)
94 áreas naturales protegidas dentro del Sinap = 10 millones de ha (5.0% del territorio nacional)	Turismo internacional receptivo total	38,324
2.8 millones de ha en 446 unidades de producción extensivas bajo manejo de particulares (1.4% del territorio nacional)	Turismo internacional arqueológico	3,449
En 1995, los viajeros al interior gastaron 6,164 millones de dólares y los viajeros al exterior gastaron 1,234.6 millones de dólares en turismo convencional	Ecoturismo (únicamente por observación de ballenas, flamencos y tortugas en dos campamentos)	5.3
446 criaderos extensivos que equivalen aproximadamente a 2,800 000 ha (1.4% del territorio nacional y 28% de las Áreas Naturales Protegidas del Sinap)		
138 viveros		
47 jardines botánicos		
77 zoológicos		
<b>Total de ingresos*</b>		<b>1,916</b>

Nota: \*Corresponde a 5% del turismo internacional receptivo total.

Fuente: Conabio, (1998)

El estudio más reciente de la estimación del ecoturismo en México realizado por el Centro de Estudios Superiores en Turismo (CESTUR, 2001) encontró que en el 2000 la demanda anual superó los 750 millones de pesos, la que representa únicamente el 0.17% del PIB turístico nacional.

### 5.4. BOSQUES

El valor del bosque se asocia a diversas funciones ambientales donde destacan: el secuestro de carbono, la protección de la erosión del suelo, hábitat de la biodiversidad, recreación, y explotación de madera Pagliola, (2006), e incluso contribuyen a mantener la salud y la productividad de los sistemas acuáticos (Bennett y Reynolds, 1993, Hodgson y Dixon, 1988 y Ruitenbeck, 1992). En este sentido, los bosques tienen un valor económico importante (Berck, 1979, Lyon, 1981, Sedjo y Lyon, 1990 y Sedjo, 1990). El inventario forestal en México de 2000 estima que existen 128 millones de hectáreas de bosques y selvas. Sin embargo, esta riqueza forestal se está destruyendo a una tasa del 1.38% anual entre 1993 y el 2000. Las causas de este proceso de deforestación son múltiples e incluyen desde factores climáticos y geográficos como causas sociales asociadas a la pobreza y de fundamentos microeconómicos e incluso de diseño de políticas públicas (Muñoz, 1994 y Muñoz, *et al.*, 2006).

Actualmente, se observan costos importantes asociados al proceso de deforestación (Cuadro 75) aunque se observa además que los costos como porcentaje del PIB tienen una tendencia a la baja; así, en 1985 representaba el 1.8% del PIB y para el 2004 ese porcentaje se redujo a sólo 0.33, como resultado de la disminución en la deforestación en ambos rubros, principalmente por tala que disminuyó a una tasa promedio de 8% anual, en comparación con la deforestación de uso de suelo que tuvo una reducción de 3% anual en promedio (Gráfica 94).



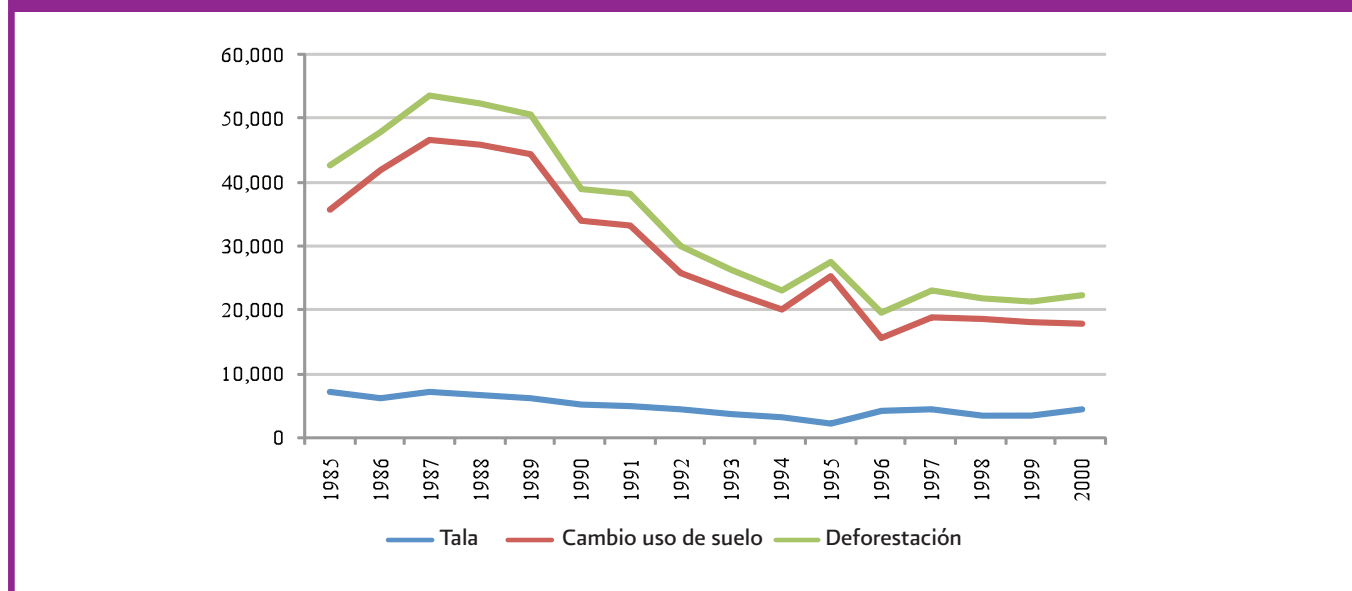
## CUADRO 75. DEFORESTACIÓN EN MILES DE METROS CÚBICOS Y MILES DE PESOS

Año	Deforestación por tala (m³)	Deforestación por cambio en el uso de suelo (m³)	Total de deforestación (m³)	Valor de la deforestación	Producto Interno Bruto	Deforestación con relación al PIB (%)
1985	7,154	35,608	42,762	882,608	47,391,702	1.86
1986	6,072	41,887	47,959	1,507,687	79,191,347	1.90
1987	7,032	46,570	53,602	3,148,099	193,311,538	1.63
1988	6,563	45,703	52,266	6,704,630	390,451,299	1.72
1989	6,095	44,433	50,528	9,384,565	507,617,999	1.85
1990	5,148	33,955	39,103	7,498,391	686,405,724	1.09
1991	5,001	33,251	38,252	8,124,457	865,165,724	0.94
1992	4,488	25,680	30,168	6,858,483	1,019,155,941	0.67
1993	3,632	22,795	26,427	8,203,218	1,256,195,971	0.65
1994	3,287	19,940	23,227	7,318,560	1,420,159,456	0.52
1995	2,178	25,300	27,478	10,086,917	1,837,019,067	0.55
1996	4,097	15,560	19,657	9,245,257	2,525,575,029	0.37
1997	4,410	18,710	23,120	17,777,134	3,174,275,217	0.56
1998	3,303	18,635	21,938	16,384,550	3,846,349,882	0.43
1999	3,333	18,053	21,386	16,486,541	4,583,762,260	0.36
2000	4,485	17,817	22,302	17,856,985	5,490,757,339	0.33
2001	1,937	17,044	18,981	15,328,056	5,811,345,673	0.26
2002	378	17,110	17,488	14,868,880	5,256,381,624	0.28
2003*				17,353,665	6,891,992,482	0.25
2004				25,772,782	7,709,095,808	0.33

Nota: A partir del 2003 cambió la metodología y no son comparables con los años anteriores.

Fuente: INEGI, 1996, 2000 y 2004.

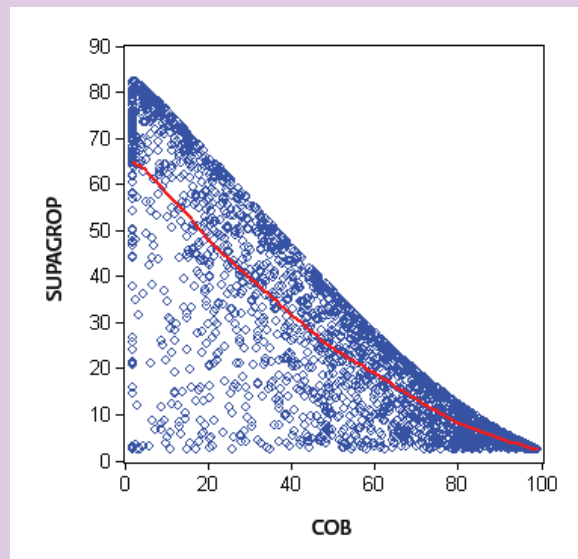
Gráfica 94. Evolución por tipo de deforestación



### Determinantes de cobertura forestal en México

Se realizó un estudio de los indicadores de presión y estado socioeconómicos a nivel municipal en México (Quadri, 2006) en donde se obtuvieron resultados en el que el índice de cobertura de los ecosistemas forestales naturales responde a diversos factores tales como la presión poblacional, la pérdida de suelos productivos naturales, presiones ambientales hídricas derivadas de las descargas de aguas y las actividades económicas, principalmente aquellas relacionadas con las prácticas agrícolas e incluso las condiciones sociales e institucionales.

La información de la cobertura de los ecosistemas forestales comprende 2,442 municipios. La diversidad de ecosistemas tiene un coeficiente de correlación de 0.74 en relación con la cobertura de ecosistemas forestales.; mientras que la superficie agropecuaria está correlacionada negativamente lo cual puede indicar que una mayor superficie dedicada a actividades agropecuarias está asociada linealmente a una menor cobertura de los ecosistemas forestales. Es decir, las variables con mayor incidencia en la cobertura forestal a nivel municipal aunque con un impacto negativo son la superficie agropecuaria y los subsidios agrícolas.



Las estimaciones realizadas sugieren que el bosque templado mexicano tiene 613 plantas que son potencialmente utilizables que pueden generar 1.17 millones de biomasa con un valor de 528 millones de dólares mientras que el bosque tropical tiene 729 millones de plantas que genera 1.6 millones de toneladas de material vegetal (CONABIO, 1998). Por su parte, la producción forestal, durante el periodo 1995-2004, representó en promedio el 0.10 por ciento del PIB nacional (Cuadro 76). La producción se concentra en la maderable, sin embargo el crecimiento de la producción no maderable es importante. Para el periodo se registro un crecimiento anual promedio en la producción de 25% y en el valor de 23%. El crecimiento del volumen de la producción maderable es incipiente de alrededor del 1.3%, sin embargo el valor presenta un crecimiento de 18%, lo que refleja un incremento significativo en la valoración de los bosques.

## CUADRO 76. PRODUCCIÓN FORESTAL EN MÉXICO, 1995-2004

Año	Maderable		No Maderable		Valor total (millones de pesos)
	Volumen (miles de m <sup>3</sup> )	Valor (millones de pesos)	Volumen (ton)	Valor (millones de pesos)	
1995	6,302.4	1,481	104,356	95.1	1,576.6
1996	6,843.8	1,896	83,366	174.9	2,071.7
1997	7,711.8	2,786	89,261	148.6	2,935.4
1998	8,331.0	3,668	95,962	186.9	3,855.4
1999	8,496.7	4,285	142,944	200.2	4,485.7
2000	9,429.8	5,153	237,043	414.3	5,567.6
2001	8,124.6	5,222	276,292	340.7	5,563.5
2002	6,664.7	5,307	143,509	282.9	5,590.8
2003	6,996.8	6,686	259,377	498.1	7,180.8
2004	6,718.5	6,397	433,097	294.1	6,692.1

Fuente: Elaboración propia con datos del INEGI.

En este sentido, los impactos del cambio climático en los boques son diferenciados. Esto es, se estima que el aumento en el CO<sub>2</sub> tendrá un efecto favorable en el crecimiento de los bosques; por ejemplo con un aumento de concentraciones de GEI de 550 ppm se traduce en un efecto positivo de entre 0 y 30% de la biomasa (IPCC, 2007), y en otro sentido los cambios en temperaturas y patrones de precipitación propiciarían incendios forestales (Costa y Foley, 2000, Zhang *et al.*, 2001, Defries *et al.*, 2002).

Asimismo, como una aproximación de la biodiversidad (Boyd y Banzhaf, 2007) se utiliza a la biomasa<sup>45</sup>. Esta selección<sup>46</sup> se fundamenta en la evidencia disponible que indica que existe una correlación positiva entre la biodiversidad y la generación de biomasa y de producción de madera (Gaston, 2000); además existe una correlación positiva entre la biomasa y los servicios de provisión y regulación tales como secuestro de carbono e inversa con la erosión del suelo (Richmond, Kaufman y Myneni, 2007). Pequeñas cantidades de nutrientes entran continuamente al sistema a través de varios procesos hidrogeoquímicos. Mediante una complicada serie de ciclos interconectados, estos nutrientes circulan entonces dentro del ecosistema, donde la mayor parte de las veces están ligadas a materia orgánica. La productividad de biomasa<sup>47</sup> en ecosistemas naturales está muy ligada a las tasas anuales a las cuales los nutrientes son capaces de ser reciclados.

En un agroecosistema, el reciclaje de nutrientes puede ser mínimo y se pierden cantidades considerables con la cosecha o como resultado de percolación o erosión, debido a una gran reducción en los niveles permanentes de biomasa mantenidos dentro del sistema (Tivy, 1990). La exposición frecuente del suelo entre las plantas de un cultivo durante el ciclo agrícola, o de los campos desnudos entre temporadas de cultivo, crea un "goteo" de nutrientes del sistema.

Una forma de estimar la contribución económica de la biomasa al proceso productivo es considerar el impacto potencial de la biomasa en los rendimientos agrícolas de cuatro productos (maíz, frijol, sorgo y trigo), empleando un modelo de sección cruzada para las 32 entidades federativas de México, para el año 2006. El modelo incluye datos de clima (temperatura promedio máxima, temperatura promedio máxima al cuadrado, precipitación promedio y precipitación promedio al cuadrado) y la biomasa medida en volumen de la producción maderable. Un aumento de

<sup>45</sup> Constanza, et al., (1998) incluye una lista de los servicios que proporciona la biomasa.

<sup>46</sup> La selección del resto de las variables está en el Anexo.

<sup>47</sup> Biomasa a la materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía. Los sistemas agrícolas y forestales son grandes productores de biomasa.

la temperatura tiene, dependiendo de la temperatura límite y del clima inicial (Mendelsohn y Neumann, 1999), un impacto inicial positivo en la producción y en los rendimientos; sin embargo, pasando ciertos límites de temperatura los impactos se hacen negativos<sup>48</sup> (Aggarword y Mall, 2002). Los resultados se sintetizan en el Cuadro 77 y muestran que la biomasa presenta un coeficiente positivo y estadísticamente significativo para los cuatro productos, siendo el frijol el que tiene el mayor coeficiente.

## CUADRO 77. MODELOS DE RENDIMIENTOS DEL MAÍZ, FRIJOL, SORGO Y TRIGO (SECCIÓN CRUZADA)

Variable	Modelo maíz ( $r_{ma_t}$ )		Modelo frijol ( $r_{fr_t}$ )		Modelo sorgo ( $r_{so_t}$ )		Modelo trigo m ( $r_{tr_t}$ )	
$tm_t$	0.331	(13.84)	0.118	(11.16)	0.324	(4.02)	0.437	(26.34)
$tm^2_t$	-0.006	(-4.74)	-0.002	(-8.51)	-0.006	(-2.35)	-0.010	(-24.42)
$pr_t$			0.0003	(1.87)	0.003	(2.91)		
$pr^2_t$	-0.0001	(-3.81)	-0.0001	(-5.60)	-0.0001	(-2.94)	-0.00001	(-5.22)
$bm_t$	0.026	(-9.61)	0.433	(2.32)	0.020	(2.28)	0.025	(3.92)
$R^2$	0.86		0.74		0.87		0.89	

Notas: Los valores entre paréntesis indican los estadísticos t-student

Año de estimación: 2006,  $tm$  = temperatura máxima,  $tm^2$  = temperatura máxima al cuadrado,  $pr$  = precipitación,  $pr^2$  = temperatura máxima al cuadrado,  $bm$  = índice de biomasa.

Con base a los coeficientes estimados del modelo de sección cruzada, se simularon los rendimientos de los productos para los diferentes escenarios de cambio climático al 2100.

Los resultados anteriores se promediaron con la finalidad de observar el impacto en los rendimientos de los productos a nivel nacional del aumento en la temperatura por el cambio climático. El Cuadro 78 sintetiza los resultados, donde se observa que tres productos presentan disminución en sus rendimientos. Destaca, en este contexto, que únicamente el frijol y el trigo presentan un aumento en los rendimientos bajo algunos escenarios, el cultivo que presentará las mayores pérdidas será el maíz.

## CUADRO 78. ESTIMACIONES DE RENDIMIENTOS DE DIFERENTES PRODUCTOS CON BIOMASA A NIVEL NACIONAL AL 2100

Producto	Variación de los rendimientos			Porcentaje en la variación de los rendimientos		
	A2	A1B	B1	A2	A1B	B1
Maíz	-1.15	-1.15	-1.07	-18.57	-18.45	-17.21
Frijol	0.12	0.12	0.14	6.66	6.73	7.82
Sorgo	-0.17	-0.16	-0.03	-2.60	-2.39	-0.46
Trigo	-0.07	-0.01	0.32	-1.57	-0.32	7.05

Fuente: Elaboración propia con los promedios de los resultados.

<sup>48</sup> Para una explicación más exhaustiva de los impactos del CC en la agricultura ver el capítulo 3.1

## 5.5 CAPTURA DE CARBONO

El manejo apropiado de la vegetación para reducir las concentraciones de CO<sub>2</sub> o almacenarlas adecuadamente se transforma en una estrategia para combatir el cambio climático<sup>49</sup> que puede otorgar beneficios económicos. En efecto, los bosques y selvas capturan, almacenan y liberan carbono como resultado de los procesos fotosintéticos, de respiración y de degradación de materia seca. Ello genera una captura neta positiva cuyo monto depende del manejo de la cobertura vegetal, así como de la edad, distribución de tamaños, estructura y composición de ésta.

Las estimaciones sobre la captura de carbono en México indican que manteniendo las áreas naturales protegidas, realizando un manejo forestal sustentable en las áreas comerciales, reforestando las áreas forestales degradadas se podría llegar a una captura de carbono de las áreas forestales de entre 3,500 a 5,400 millones de toneladas de carbono en un periodo de 100 años. Ello equivale a una captura anual de entre 35-54 millones de toneladas de carbono por año (Cuadro 79) (Bellón *et al.*, 1993). Asimismo, las estimaciones realizadas por otros autores en donde se proyecta la pérdida de carbono debida a cambios de uso del suelo, ya sea convirtiendo el área forestal a usos agrícolas o de agostadero se sintetizan en el Cuadro 80. Por ejemplo, Adger *et al.* (1995), encontraron que la selva alta y los bosques de coníferas son particularmente relevantes en la captura de carbono mientras que Masera (1995) atribuye a la áreas reforestadas y plantaciones comerciales, la mayor captura de carbono. Por su parte, Torres y Guevara (2002), estimaron el potencial de captura de carbono por medio de un modelo para estimar el peso seco en función del tipo de bosque (Cuadro 81).

### CUADRO 79. POTENCIAL DE ABSORCIÓN DE CARBONO EN EL SECTOR FORESTAL EN UN PERIODO DE 100 AÑOS

Opción	Superficie Potencial (millones ha)	Absorción de carbono (Tn C /ha)	Absorción Total Acumulada (Millones Tn C)
<b>Conservación</b>			
Áreas naturales protegidas	6.0	40-130	500-600
Manejo forestal comercial	18.7	40-130	1,500-2,300
Protección forestal	0.06/año (neto)	2.4-8.4 Millones de Tn C / año	Na
Estufas eficientes de leña	Na	1-3 Millones de Tn C / año	50-300
<b>Reforestación</b>			
Reforestación áreas degradadas	16.6	50-150	1,300-1,800
Plantaciones comerciales	1.6-3.0	50-120	200-400
Total	42.7-44.3		3,500-5,400

Fuente: Bellón *et al.*, (1993)

<sup>49</sup> Véase por ejemplo el desarrollo del mercado forestal de carbono en Canadá (Bull, 2005) o Australia (Brand, 2005).

## CUADRO 80. ESTIMACIONES DE CAPTURA DE CARBONO

Tipo Forestal	Condición	Captura (Tn C/ha)		Referencia
		Pastizal	Agricultura	
Bosque de coníferas Bosque caducifolio Selva alta Selva baja y mediana	Pérdida de carbono por cambio de uso del suelo	164.8 34.0 164.8 92.5	167.1 31.5 163.5 91.2	Adger <i>et al.</i> (1995)
Áreas naturales protegidas Bosque comercial Áreas reforestadas Plantaciones comerciales	Estimación para un periodo de 100 años	40-130 40-130 50-150 50-120		Masera, (1995)
Cerco vivo Plantación forestal Sistema taungya Acahual enriquecido	Bosque de pino-encino en partes altas (Chiapas) periodo de 150 años	39 121 124 124		Gus Hellier (2000)
Cerco vivo Plantación con árbol de sombra Sistema taungya Acahual enriquecido	Bosque de transición; zona cafetalera (Chiapas) Periodo de 150 años	92 116 277 277		Gus Hellier (2000)

Fuente: Resumen obtenido de las referencias citadas.

## CUADRO 81. MODELOS PARA ESTIMAR PESO SECO (KG) A PARTIR DEL VOLUMEN TOTAL ÁRBOL (M<sup>3</sup>) POR TIPO DE BOSQUE.

Tipo de bosque	$\beta_1$		$\beta_0$		R <sup>2</sup>	F
	Estimador	T	Estimador	T		
Coníferas	723.57	39.91	-175.49	3.65	0.99	1,592.66
Latifoliadas	506.53	24.12	0.17	0.30	0.96	572.46
Coníferas y latifoliadas	859.02	15.07	-7.05	1.35	0.97	219.38
Selva alta y mediana	519.40	59.65	0.89	1.47	0.99	3,572.32
Selva baja	313.03	18.27	12.22	2.01	0.97	333.87

Fuente: Torres y Guevara (2002). Modelo: Peso seco (Kg) =  $\beta_0 + \beta_1$  Volumen Total árbol (m<sup>3</sup>)

Así, las estimaciones sobre el valor de los depósitos de carbono en los diferentes tipos de bosques se muestran en el Cuadro 82, donde el promedio es de 2,250 dólares por hectárea, oscilando de 600 a 3,600. En el Cuadro 83 se presentan las estimaciones del valor de la pérdida de inventario de CO<sub>2</sub> debidas a cambio de suelo por hectárea. El promedio de los diferentes bosques y selvas por cambio a agricultura es de 2,313 dólares, mientras que por la ganadería es de 2,412. La pérdida es mayor en el bosque tropical siempreverde del agostadero, y por la agricultura la pérdida es mayor en el bosque templado conífero.

## CUADRO 82. ESTIMACIONES DEL VALOR DE LOS DEPÓSITOS DE CARBONO EN LOS BOSQUES Y SELVAS (USD\$/HA)

Bosque templado caducifolio	Bosque tropical caducifolio	Bosque templado	Bosque tropical siempreverde
600	1,800	3,000	3,600

Fuente: Muñoz, 1994

## CUADRO 83. VALOR DE LA PÉRDIDA DE INVENTARIO DE CO<sub>2</sub> DEBIDAS A CAMBIO DE SUELO POR HECTÁREA

Tipo de bosque	Cambio de uso del suelo (USD\$)	
	Agostadero	Agricultura
Templado caducifolio	693	643
Tropical caducifolio	1,887	1,863
Templado conífero	3,436	3,410
Tropical siempreverde	3,633	3,337

Fuente: CSERGE, 1993

La valoración económica de esta captura de carbono requiere, desde luego, de otorgar un precio a la tonelada de carbono. Sin embargo, estos precios oscilan de manera importante y van desde 3 dólares la tonelada de carbono (10 dólares la tonelada de carbón) a 95 dólares la tonelada de carbono (350 dólares la tonelada de carbón). Por ejemplo, el IPCC (2007) estima a 12 dólares la tonelada de carbono que implica 43 dólares por tonelada de carbón. Nordhaus (1992) sugiere un costo marginal de US\$5 / Tn de C, mientras que Frankhauser (1995) estima este costo en US\$20 / Tn de C. En el Cuadro 84 se resumen algunas estimaciones del mercado de unidad de carbono. Destaca Montoya *et al.* (1995) que estiman los costos de los proyectos de captura de carbono para el sur de México oscilando entre US\$ 3-11 / Tn de C.

## CUADRO 84. VALOR DE CADA UNIDAD DE CARBONO FIJADO DE ACUERDO A VARIOS AUTORES

Concepto de Valoración	Valor US\$/Tn C	Tipo de Proyecto	Referencia
Costo de oportunidad global	20	Conservación	Adger, <i>et al.</i> (1995)
Valor del proyecto	1.9-2.89 7.6-10.52	Conservación Reforestación	Rojas (1999)
Negociación	8-12	Proyectos varios (agroforestales, reforestación)	Fondo Bio-climático
Proto-Carbón Credits	12	Proyectos varios	Edinburg Centre for Carbon Management

Fuente: Torres y Guevara, (2002)

Finalmente en el capítulo 3.3, de uso de suelo se realizaron estimaciones de la forma en que el cambio climático va a incidir en el cambio en el uso del suelo y en consecuencia en la captura de carbono. Para evitar doble contabilidad, no se incluyeron en este capítulo los costos asociados a la captura de carbono.

### 5.6 VALOR ESTÉTICO DE LOS BOSQUES

Las estimaciones sobre el valor de existencia del bosque en México sugieren que los agentes económicos están dispuestos a pagar un valor de 10 dólares por hectárea de bosque (CONABIO, 1998). Ello significa un total de 112 millones de dólares atendiendo a las 11.2 millones de hectáreas protegidas. Las áreas naturales protegidas federales actualmente reciben aproximadamente 5,500,000 visitantes al año, lo que representa una derrama económica por la prestación directa del servicio calculada en 3,000 millones de pesos (CONANP, 2007a). Esta cifra equivale a un 2.3 % del gasto total del turismo receptivo.

Los resultados de un estudio más específico de ecoturismo en diversos centros de recreación del país realizado por el Centro de Investigación Social y Económica en el Ambiente Global (Centre for Social y Economic Research on the Global Environment, 1993), encontró que el ingreso anual por turismo en reservas naturales y parques nacionales alcanzan los 1.18 millones de dólares considerando el promedio del precio real pagado y el precio disponible a pagar (Cuadro 85). La reserva de la Mariposa Monarca muestra el mayor ingreso, como resultado del gran número de visitantes y del precio de disponibilidad a pagar de los visitantes. La reserva de la Biosfera de Sian Ka'an tiene el precio pagado más elevado, así como la mayor superficie. El mayor número de visitantes por año lo tiene las Barrancas del Cobre, y finalmente el Parque Nacional Izta-Popo tiene el mayor ingreso anual por hectárea.



## CUADRO 85. ECOTURISMO Y SU POTENCIAL EN SEIS CENTROS DE RECREACIÓN

Turismo	Centro de recreación	Tipo de área	Área (ha)	Visitantes por año (años de referencia)	Precio pagado o disponibilidad a pagar (USD)	Ingreso anual (USD)	Ingreso anual por hectárea
Eco turistas	El Triunfo (Chiapas)	Reserva de la biósfera	119,177	150 (1991)	i) 17.15 <sup>1</sup> ii) 75 <sup>2</sup>	i) 2,572 ii) 11,250	i) 0.02 i) 0.09
	Sian Ka'an (Quintana Roo)	Reserva de la biósfera	528,147 <sup>3</sup>	500 (1989-1993)	115 <sup>4</sup>	57,500	0.11
Turistas de destinos múltiples	Izta-Popo (México, Morelos, Puebla)	Parque nacional	55	12,406	15 <sup>5</sup>	12,406	225
	Lago Arareco (Chihuahua)	Complejo ecoturístico	20,000	7,500 (1992-1993)	i) 3.33 <sup>6</sup>	i) 24,974	i) 1.24
					ii) 4.42 <sup>7</sup>	ii) 33,150	ii) 1.65
	Mariposa Monarca (Michoacán)	Reserva especial	16,110	47,500 (1986-1992)	i) 5 <sup>8</sup>	i) 237,500	i) 14.7
					ii) 30 <sup>9</sup>	ii) 1,425,000	ii) 88.4
	Barranca del Cobre (Chihuahua)	Declarado parque nacional	450,000	55,000 (1992)	i) 3.27	ii) 179,850	i) 0.40
ii) 8.20					ii) 451,000	ii) 1.01	

Fuente: CSERGE, (1993) Notas: i) Corresponde al precio real pagado; ii) Corresponde al precio disponible a pagar. <sup>1</sup> Promedio individual estimado de gasto por servicios de transportación, comida y servicios de guía en un tour. <sup>2</sup> Posible donación individual basada en el promedio del excedente del consumidor de \$470, calculado con un análisis de costo de viaje (Touval 1992). <sup>3</sup> Este número se refiere únicamente a los visitantes de la reserva tomando el tour de un día en bote. El número total de visitantes es probablemente más alto, pero muchos de los visitantes entran a Sian Ka'an a través de muchas entradas que no están controladas (Bezauri, 1993). <sup>4</sup> El precio de un día de tour en bote en la reserva. <sup>5</sup> Los números mayores se refieren solamente a los visitantes que pasan la noche, los cuales pagan una cuota de entrada menor a un dólar. <sup>6</sup> Cuota de entrada individual. <sup>7</sup> Cuota de entrada más el promedio ponderado de otros servicios adquiridos por los visitantes (alquiler de botes, bicicletas de montaña, caballos, espacio para acampar). <sup>8</sup> Admisión al santuario (adultos). <sup>9</sup> Precio promedio de un tour desde la ciudad de México (transportación, boleto de admisión).

## 6. VALORACIONES DE LA BIODIVERSIDAD

Existen numerosos estudios que valoran la biodiversidad en todo el mundo con diversas metodologías tales como valoración contingente, precios de mercado, precios hedónicos, función de producción y meta análisis entre otros. Una estimación muy conocida es desde luego la de Constanza *et al.*, (1997) que encuentra que el valor de los servicios que presta la naturaleza, sería de unos 33 trillones de dólares al año, casi dos veces el PIB anual mundial (18 trillones). En México se cuenta con algunas estimaciones sobre el valor económico de ciertos ecosistemas, algunos recursos naturales y especies particulares de la vida silvestre. Sin embargo, aún no se puede considerar estas valoraciones para asignarle un valor directo a la biodiversidad, debido a la escasa información disponible. En el Cuadro 86 se sintetizan los estudios realizados de valoración económica para la biodiversidad en México. Se observa que los métodos más empleados son valoración contingente, función de producción y costo-beneficio. No se encontró algún estudio que valore los servicios de regulación. Los resultados son muy variados, y son para diferentes regiones del país, lo que dificulta generar un valor agregado.

## CUADRO 86. VALORACIÓN ECONÓMICA DE SERVICIOS DE LA BIODIVERSIDAD EN MÉXICO

Servicio ecosistémico	Estudio específico	Método de Valoración										Autor(es)	Estimaciones	
		Valoración contingente	Costo de viaje	Función de producción	Costos evitados	Costos de replazo	Precios hedónicos	Ingreso por turismo	Metanálisis	Análisis costo-beneficio	Mercado			
<b>SERVICIOS DE SOPORTE</b>														
Hábitat	Valoración del hábitat de los manglares de la laguna de Términos e Isla del Carmen mediante diversos métodos de acuerdo a los usos	✓		✓									Lara Domínguez et al. (1998)	Se obtuvo un valor total de \$17,492.40 y \$6.4/ha/año
<b>SERVICIOS DE PROVISIÓN</b>														
Materias primas	Valoración de madera y pesquerías de los manglares de la laguna de Términos e Isla del Carmen mediante diversos métodos de acuerdo a los usos (directos – indirectos)	✓		✓									Lara Domínguez et al. (1998)	Madera para carbón: \$11.5pesos/ha/año Madera para construcción: \$2.5pesos/ha/año Pesquerías dependientes: \$9948pesos/ha/año
Filtrado de aguas residuales	Filtrado de aguas residuales en los manglares de la laguna de Términos e Isla del Carmen												Lara Domínguez et al. (1998)	Filtrado de aguas residuales: \$7524pesos/ha/año
<b>SERVICIOS CULTURALES</b>														
Recreación	Valor de recreación por arrecifes de corales								✓				Brander et al. (2007)	\$ 18.4 por visita
Recreación	Gasto en ecoturismo en México		✓										Pina (1994)	\$6-10 por día
Recreación	Gasto en ecoturismo en México												Adger et al. (1995)	70 dólares por día
Recreación	Demanda de ecoturismo en México												CESTUR (2001)	750 millones de pesos
Recreación	Estimación de los beneficios de recreación en el Santuario el Campanario donde hiberna la mariposa monarca (Michoacán, México)	✓											Pérez Septién (1998)	\$24.6 promedio
Cuasi-opción	Bioprospección de los bosques mexicanos											✓	Adger et al. (1995)	6.4 dólares por hectárea
<b>VALORACIÓN DE ESPECIES</b>														
	Conservación de las aves acuáticas migratorias en el corredor central	✓											Desvousges et al. (1993)	\$59-71
	Valoración de la ballena gris y la ballena jorobada en Baja California, México								✓				Ávila Foucat (1998)	Promedio diario \$2210pesos/día.

## CUADRO 86. VALORACIÓN ECONÓMICA DE SERVICIOS DE LA BIODIVERSIDAD EN MÉXICO (CONTINUACIÓN)

Servicio ecosistémico	Estudio específico	Método de Valoración										Autor(es)	Estimaciones
		Valoración contingente	Costo de viaje	Función de producción	Costos evitados	Costos de replazo	Precios hedónicos	Ingreso por turismo	Metanálisis	Análisis costo-beneficio	Mercado		
	Valoración de la migración de las mariposas monarca en México	✓	✓									Romo (1998)	\$1.0 - \$2.0 por km. En Estados Unidos de Norteamérica DAP \$160.8 en Cd. México \$165
	Aprovechamiento de aves canoras y de ornato											Ávila-Foucat (2006)	4.6 millones de pesos
	Palo de Hierro en Quintana Roo											Asociación mexicana de arte y cultura.	\$1700 pesos por m <sup>3</sup>
	Valoración de 100 árboles de mamey en la región de San Andrés Tuxtla, Veracruz México											Ricker (1998)	\$30

Fuente: Elaboración propia con base a las referencias citadas.

## 7. LA BIODIVERSIDAD Y LOS IMPACTOS CLIMÁTICOS

La biodiversidad contribuye de manera significativa al conjunto de las actividades productivas a través de los conocidos servicios de provisión, regulación o incluso culturales (Millenium Ecosystem Assessment, 2005). Sin embargo, esta contribución se realiza en buena medida por fuera del mercado por lo que no se reporta como costos o ingresos monetarios. En este sentido, desde el punto de vista económico, la biodiversidad tiene un conjunto de externalidades positivas que no son contabilizadas (Nordhaus y Kokkelenberg, 1999); más aun puede argumentarse que la inexistencia de la biodiversidad tendría costos económicos sustanciales incluso mayores que aquellos asociados a su contribución a la producción que en ocasiones se han estimado atendiendo a los costos de oportunidad o defensivos. Existen, desde luego, diversas formas de cuantificar esta contribución económica de la biodiversidad. Uno de estos métodos es considerar a la biodiversidad o sus servicios ecosistémicos como un factor o insumo productivo.

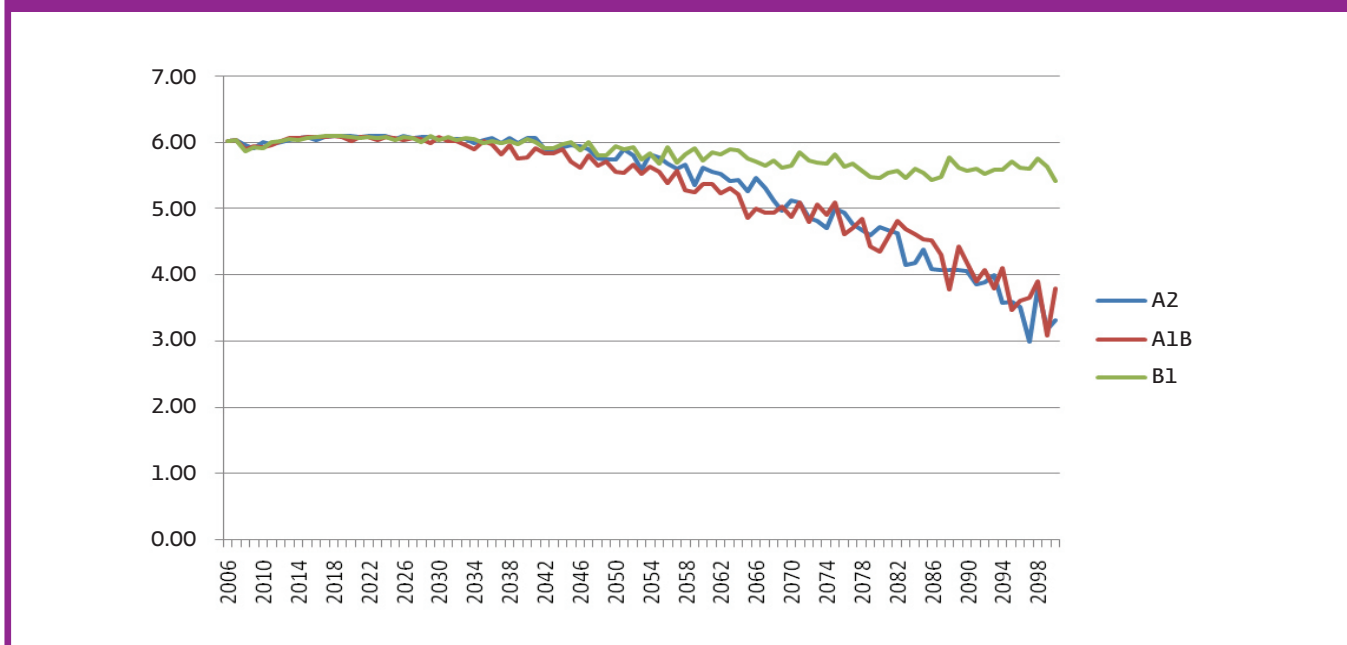
Con la finalidad de analizar el impacto del cambio climático en la biodiversidad y en el producto se modeló, inicialmente, un índice de biodiversidad potencial en función de variables climáticas y territoriales<sup>50</sup>. La información disponible para la construcción de éste índice es por entidad federativa. De esta forma, se simuló el comportamiento del índice promedio de acuerdo a la siguiente especificación para buscar capturar el impacto climático:

$$(21) \quad ib_i = \beta_0 + \beta_1 tm_i + \beta_2 tm_i^2 + \beta_3 pr_i + \beta_4 pr_i^2 + u_i$$

Con los coeficientes obtenidos se pronosticaron los impactos del cambio en temperatura de los diferentes escenarios de cambio climático y en donde se observa que este índice tiene una disminución en el tiempo, que se ve acentuado en los modelos A2 y A1B (Gráfica 95). Así, en los primeros años, el aumento en la temperatura tiene un efecto benéfico en el índice de biodiversidad potencial, que sin embargo, comienza a presentar disminuciones, y ya para el 2050 existen pérdidas de 1.4% en el escenario más conservador (B1), llegando a 4.6% en el escenario A2 (Cuadro 87). A partir de este punto la disminución es progresivamente mayor, llegando al 2100, a reducciones del 44.5% en el escenario extremo y del 10% en el escenario de menor aumento de temperatura. Esto significa una pérdida de casi la mitad de la biodiversidad lo que resulta, desde todo punto de vista, inaceptable.

<sup>50</sup> En el anexo se reporta una descripción de todas las variables usadas en los modelos y la forma en que se construyeron los índices.

Gráfica 95. Pronósticos de la biodiversidad



**CUADRO 87. CAMBIO EN EL ÍNDICE DE BIODIVERSIDAD POTENCIAL BAJO DIFERENTES ESCENARIOS DE CC (CAMBIO PORCENTUAL RESPECTO A 2006)**

Año	Escenarios		
	A2	A1B	B1
2030	0.465	0.863	0.229
2050	-4.651	-7.744	-1.388
2100	-44.840	-37.082	-10.162

Fuente: Elaboración propia con datos del modelo de biodiversidad.

La función de producción (Solow, 1956) relaciona al producto total con sus factores productivos donde normalmente se incluye al capital y al trabajo y en donde en forma creciente se incluyen otras variables asociadas en muchos casos con aspectos ambientales tales como la energía, la contaminación o la degradación ambiental y la biodiversidad (Maabey, Hall, SNT, Gupta, 1997 y Coase, 1960). En particular, la estimación de una función de producción que incluya a la biodiversidad como una de los factores productivos permite estimar la contribución marginal de la biodiversidad a la producción y, por esta vía, el precio sombra de los servicios ecosistémicos. En este caso, se incluye, entre otros aspectos, la contribución de la biodiversidad a la dispersión de semillas, la polinización y la regulación de plagas y sus impactos negativos. De este modo, la función de producción se puede expresar como:

$$(22) \quad y = f(k, l, bio)$$

Donde "y" es el producto agrícola, "k" son los factores de capital, "l" el empleo en el sector agrícola y "bio" la biodiversidad. Las estimaciones de la función de producción, se sintetizan en el Cuadro 88. Se estimaron dos modelos con diferentes índices de biodiversidad potencial, el otro índice fue construido con base a las superficies ponderadas de

diferentes ecosistemas en las entidades federativas. Ambos índices son estadísticamente significativos, sin embargo se optó por modelar el índice que incorpora variables climáticas debido a que permite simular la forma en que cambiaría en el tiempo, mientras que la superficie de ecosistemas no se puede asociar directamente. La función de producción estimada muestra los coeficientes de temperatura y precipitación consistentes con la teoría, asimismo el empleo y la superficie mecanizada presentan coeficientes positivos.

## CUADRO 88. MODELOS DE RENDIMIENTOS DEL PRODUCTO INTERNO BRUTO AGRÍCOLA CON EL PROMEDIO DE LA TEMPERATURA MÁXIMA

Variable	Modelo PIB Agrícola ( $ya_t$ )		Modelo PIB Agrícola ( $ya_t$ )	
$tmx_t$	0.8857	(55.30)	0.9337	(168.79)
$tmx_t^2$	-0.0164	(-53.71)	-0.0161	(-100.62)
$pr_t$	0.0005	(6.66)	0.00007	(17.67)
$prd_t$	-0.0184	(-6.82)	-0.0314	(-36.02)
$em$	0.000005	(12.70)	0.000006	(151.98)
$sm_t$	1.1821	(6.93)	0.6007	(10.65)
$ib_t$	0.4602	(9.54)	-----	-----
$bs_t$	-----	-----	0.0523	(9.09)
$R^2$	0.9805		0.9942	

Notas: Los valores entre paréntesis indican los estadísticos t-student

Año de estimación: 2006

Variables:  $tmx$  = temperatura máxima,  $tmx^2$  = temperatura máxima al cuadrado,  $pr$  = precipitación,  $prd$  = desviaciones de la precipitación,  $em$  = empleo,  $sm$  = Superficie mecanizada,  $bs$  = Índice de biodiversidad de superficies de ecosistemas,  $prd$  = desviación de precipitación,  $ib$  = Índice de biodiversidad potencial

Asimismo, la estimación de los rendimientos de algunos productos agrícolas seleccionados considerando variables climáticas, el porcentaje de superficie de riego y el índice de biodiversidad potencial se muestran en el Cuadro 89 donde se observa nuevamente la importancia del índice de biodiversidad potencial.

## CUADRO 89. MODELOS DE RENDIMIENTOS DEL MAÍZ, FRIJOL, SORGO Y TRIGO

Variable	Modelo maíz ( $rma_t$ )	Modelo frijol ( $rfr_t$ )	Modelo sorgo ( $rso_t$ )	Modelo trigo ( $rtr_t$ )
$tm_t$	0.363 (5.125)	0.074 (2.279)	0.998 (7.655)	0.557 (3.301)
$tm_t^2$	-0.096 (-6.779)	-0.004 (-4.541)	-0.043 (-14.590)	-0.019 (-2.604)
$pr_t$	0.001 (7.385)	0.001 (3.568)	0.011 (5.983)	0.0002 (0.168)
$psr_t$	0.170 (2.494)	0.158 (7.039)	0.202 (4.563)	0.274 (2.868)
$ib$	0.021 (1.453)	0.016 (4.938)	0.045 (3.660)	0.036 (1.805)
$R^2$	0.995	0.963	0.995	0.998

Notas: Los valores entre paréntesis indican los estadísticos t-student

Año de estimación: 2006.  $tm$  = temperatura máxima,  $tm^2$  = temperatura máxima al cuadrado,  $pr$  = precipitación,  $psr$  = porcentaje de la superficie agrícola regada,  $ib$  = índice de biodiversidad potencial.

## 8. COSTO TOTAL DE LA BIODIVERSIDAD

Las estimaciones realizadas sobre el costo agregado monetario de la pérdida de biodiversidad se sintetizan en el Cuadro 90. Estos resultados muestran que las pérdidas no sobrepasan al 1% del PIB total. Es importante considerar, que los valores de mercado fueron calculados considerando los cambios en el índice de biodiversidad potencial. Asimismo, los valores indirectos fueron únicamente la diferencia de los cambios en los rendimientos modelando el cambio climático con los escenarios de temperatura y los rendimientos que además incluían la modelación del índice de biodiversidad potencial con cambios en la temperatura.

Ello otorga un resultado indicativo del impacto económico del cambio climático por pérdida de biodiversidad. En los costos indirectos asociados a la biodiversidad se consideró únicamente el PIB agrícola; aunque es posible que algunos de estos costos ya estén contabilizados en los costos de la renta, de la tierra y de los rendimientos de algunos productos.

## CUADRO 90. COSTOS TOTALES DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN BIODIVERSIDAD 2050 Y 2100 BAJO DIFERENTES ESCENARIOS (PORCENTAJE DEL PIB)

Tipo de valuación	Variable	2050								
		Tasa de descuento 0.5%			Tasa de descuento 2%			Tasa de descuento 4%		
		B1	A1B	A2	B1	A1B	A2	B1	A1B	A2
Valores de Mercado	Bioprospección	0.0090	0.0302	0.0091	0.0056	0.0183	0.0049	0.0034	0.0100	0.0023
	Explotación de especies	0.0014	0.0047	0.0014	0.0009	0.0029	0.0008	0.0005	0.0016	0.0004
	Turismo ecológico	0.0016	0.0053	0.0016	0.0010	0.0032	0.0008	0.0006	0.0017	0.0004
	Valor estético de bosques	0.0063	0.0210	0.0063	0.0039	0.0127	0.0034	0.0024	0.0069	0.0016
	<b>SUB TOTAL</b>	<b>0.0182</b>	<b>0.0613</b>	<b>0.0185</b>	<b>0.0113</b>	<b>0.0370</b>	<b>0.0099</b>	<b>0.0069</b>	<b>0.0202</b>	<b>0.0047</b>
Valores Indirectos	PIB agrícola	0.0023	0.0042	0.0016	0.0013	0.0016	0.0006	0.0008	0.0001	0.0001
	Rendimientos maíz	0.0005	0.0035	0.0006	0.0002	0.0020	0.0001	0.0001	0.0010	-0.0001
	Rendimientos frijol	-0.0536	-0.0295	0.0004	-0.0277	-0.0155	0.0001	-0.0117	-0.0066	0.0000
	Rendimientos trigo	0.0001	0.0166	0.0001	0.0001	0.0088	0.0000	0.0000	0.0038	0.0000
	Rendimientos sorgo	0.0003	0.0020	0.0003	0.0001	0.0011	0.0001	0.0000	0.0006	0.0000
	Renta de la tierra	0.0009	0.0085	0.0092	0.0026	0.0065	0.0070	0.0032	0.0048	0.0051

Tipo de valuación	Variable	2100								
		Tasa de descuento 0.5%			Tasa de descuento 2%			Tasa de descuento 4%		
		B1	A1B	A2	B1	A1B	A2	B1	A1B	A2
Valores de Mercado	Bioprospección	0.0998	0.3777	0.4000	0.0338	0.1249	0.1337	0.0086	0.0308	0.0341
	Explotación de especies	0.0156	0.0592	0.0627	0.0053	0.0196	0.0209	0.0013	0.0048	0.0054
	Turismo ecológico	0.0173	0.0657	0.0695	0.0059	0.0217	0.0232	0.0015	0.0054	0.0059
	Valor estético de bosques	0.0694	0.2626	0.2782	0.0235	0.0869	0.0930	0.0060	0.0214	0.0237
	<b>SUB TOTAL</b>	<b>0.2022</b>	<b>0.7652</b>	<b>0.8104</b>	<b>0.0685</b>	<b>0.2531</b>	<b>0.2708</b>	<b>0.0173</b>	<b>0.0624</b>	<b>0.0692</b>
Valores Indirectos	PIB agrícola	0.0363	0.0853	0.0758	0.0135	0.0304	0.0263	0.0042	0.0080	0.0069
	Rendimientos maíz	0.0153	0.0585	0.0542	0.0054	0.0207	0.0178	0.0015	0.0059	0.0043
	Rendimientos frijol	0.0110	-0.0011	0.0391	0.0039	0.0040	0.0128	0.0011	0.0024	0.0031
	Rendimientos trigo	0.0038	0.0360	0.0134	0.0013	0.0105	0.0044	0.0004	0.0023	0.0011
	Rendimientos sorgo	0.0088	0.0336	0.0311	0.0031	0.0119	0.0102	0.0009	0.0034	0.0025
	Renta de la tierra	0.0149	0.0096	0.0121	0.0091	0.0072	0.0083	0.0057	0.0051	0.0056

Sin embargo, estos costos resultan relativamente bajos considerando todos los servicios ecosistémicos que la biodiversidad proporciona y atendiendo a que el impacto en pérdida de biodiversidad puede alcanzar el 44%. Esta diferencia entre la pérdida física y la pérdida en valor monetario es significativa. Ello indica que los incentivos económicos no resultan suficientes para controlar las tendencias al deterioro ambiental que ya existen y que se verán intensificadas por los impactos del cambio climático.

## 9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Los impactos del cambio climático sobre la biodiversidad son ciertamente importantes en el caso de México atendiendo tanto al corto plazo como en el largo plazo. En efecto, los impactos negativos del cambio climático se acumulan sobre tendencias y comportamientos que ya están generando una pérdida importante de la biodiversidad en México. En este sentido, los impactos del cambio climático pueden verse incrementados y rebasar los límites de tolerancia como consecuencia del *stress* al que ya están sometidos los ecosistemas. Los impactos esperados, en el *largo plazo*, son de una magnitud alarmante, llegando incluso a la destrucción de los ecosistemas y la pérdida de especies, y en el corto plazo intensificarán los procesos de degradación.
2. Los impactos del cambio climático a nivel internacional sugiere que un aumento de la temperatura promedio de dos o tres grados centígrados, es probable que se traduzca en una pérdida de entre el 20 y el 40% de la biodiversidad del planeta (IPCC, 2007). Esta evidencia se basa tanto en la observación directa de los cambios en los patrones de la biodiversidad y en los modelos teóricos disponibles que muestran que los cambios observados en la biodiversidad difícilmente pueden atribuirse a procesos naturales.
3. Las proyecciones sobre las respuestas de la biodiversidad ante el cambio climático presentan un alto grado de incertidumbre y son imposibles de predecir con precisión actualmente (Hannah, *et al.*, 2002). En efecto, los procesos de adaptación de las especies al nuevo clima son muy variadas y dependen de factores difíciles de predecir en la actualidad.
4. Las consecuencias del cambio climático sobre los sistemas biológicos no sólo afectan a las variables asociadas a la configuración de los ecosistemas, sino que estos sistemas también experimentan una reorientación de sus funciones. De esta forma, son diversos procesos ecológicos que se ven afectados por el cambio climático: la productividad, la dinámica poblacional, la abundancia, la distribución de especies, entre otros.
5. Los impactos del cambio climático en la biodiversidad de México están asociados al aumento de temperatura, cambios en la precipitación y eventos extremos y por el cambio en el uso de suelo. Estos cambios llevarán a incrementar los niveles de desertificación en el norte del país, incrementando la superficie afectada por sequías (Lozano, 2004 y Hernández y Valdez, 2004); el cambio en el uso de suelo y la temperatura impactará en los bosques principalmente de coníferas reemplazándolos por bosques espinosos, sub-tropicales y tropicales, estos cambios impactarán en la captura de carbono y el número de incendios (de Jong, Masera y Hernández-Tejada, 2004, Ibarrarán, 2007). Debido a este desequilibrio ecológico habrá, posiblemente, una destrucción de la fauna de hasta del 40% (Peterson, *et al.*, 2002, 1999 y 2001).
6. En las costas el 46% de las especies es sensible al ascenso en el nivel del mar (Peterson, *et al.*, 2002, 1999 y 2001). Este aumento incide en la erosión, salinización de tierras, aguas superficiales y mantos freáticos, inundaciones. Los impactos para los ecosistemas marinos, es decir, la destrucción de los hábitats costeros críticos dependerán de la velocidad con que ocurra el cambio climático; para el golfo de México se han identificado riesgos para ciertas regiones (Ortiz y Meléndez, 2000) e impactos potenciales para las pesquerías de camarón (Park, 2001).
7. Como una aproximación del valor de la biodiversidad asociada a la bioprospección de bosques y selvas. Utilizando el valor promedio de Adger *et al.* (2005) se tiene que para el año 2000 los bosques tienen un valor de cuasi-opción de 416.8 millones de dólares.
8. Los valores anualizados de la biodiversidad derivados de la conservación de especies son de aproximadamente de 397.4 millones de pesos corrientes, en donde el que aporta más es la actividad cinegética, el aprovechamiento de aves canoras y de ornato y la exportación de vertebrados son de menor magnitud y en conjunto suman 9.3 millones de pesos.

9. La demanda anual del ecoturismo en México se estima en 750 millones de pesos en el 2000, la cual representa el 0.17% del PIB turístico nacional (CESTUR, 2001).
10. Existe una correlación positiva entre la biodiversidad y la generación de biomasa y de producción de madera (Gastón, 2000); además existe una correlación positiva entre la biomasa y los servicios de provisión y regulación tales como secuestro de carbono e inversa con la erosión del suelo (Richmond, Kaufman y Myneni, 2007).
11. La biomasa presenta un coeficiente positivo y estadísticamente significativo para los rendimientos de cuatro productos, siendo el frijol el que tiene el mayor coeficiente. En general los resultados son variables. Así, tres productos presentan disminución en sus rendimientos, únicamente el frijol y el trigo presenta, en algunos escenarios, un aumento en los rendimientos.
12. Las estimaciones sobre el valor de existencia del bosque en México calculan que las áreas naturales protegidas federales actualmente reciben aproximadamente 5,500,000 visitantes al año, lo que representa una derrama económica por la prestación directa del servicio calculada en 3,000 millones de pesos (CONANP, 2007a). Esta cifra equivale a un 2.3 % del gasto total del turismo receptivo.
13. Los resultados de las simulaciones del índice de biodiversidad potencial muestran que el aumento en la temperatura tiene un efecto benéfico en éste índice, que sin embargo comienza a presentar disminuciones, y ya para el 2050 existen pérdidas. A partir de este punto la disminución es progresivamente mayor, llegando al 2100 a disminuciones del 44.5% en el escenario extremo y del 10% en el escenario de menor aumento de temperatura. Estos niveles son inaceptables desde cualquier punto de vista.
14. Las simulaciones de costos indirectos, a través de la función de producción del PIB agropecuario y de los rendimientos de cuatro productos agrícolas muestra que existen costos asociados al cambio en biodiversidad que impactan en la producción agrícola.
15. Los costos asociados a la biodiversidad al 2100 se ubican, en el escenario A2, entre 0.06% y 0.8% del PIB con tasas de descuento del 0.5% y 4% respectivamente.
16. La estimación del valor actual de la biodiversidad y por tanto de sus costos muestra que la estructura de precios actuales ofrece un subsidio fuera del mercado importante (Nordhaus y Kokkelenberg, 1999). Las consecuencias de ello son desde luego la sobreexplotación y destrucción de la biodiversidad. Los resultados obtenidos que aparecen limitados sobre el impacto climático en biodiversidad sólo refleja lo difícil del estudio del tema (Thomas, 2004).
17. La presencia de esta diferencia significativa entre pérdida de biodiversidad y sus costos económicos indica que las contribuciones de la biodiversidad no son actualmente valorados a través del mercado. En este sentido, y más allá de los análisis de costos económicos debe instrumentarse una estrategia de preservación. Las consecuencias éticas de la pérdida de biodiversidad son, desde luego, inaceptables para un país como México catalogado de megadiverso.



## RECOMENDACIONES

- a. La conservación de la biodiversidad es sin duda una prioridad más allá de los costos o beneficios económicos. En este sentido, es necesario considerar el principio de precaución y establecer un estándar mínimo considerando la irreversibilidad de la pérdida biológica, el riesgo y la incertidumbre (Bauer, 2005). Así, es necesario evitar situaciones catastróficas (Limburg, O'Neill, Constanza, y Farber, 2002) y de pérdida de especies.
- b. Existen opciones limitadas para la adaptación en algunos ecosistemas (por ejemplo, los arrecifes coralinos áreas en altas latitudes/altas altitudes) debido a su sensibilidad y/o exposición al cambio climático. Para algunos de estos ecosistemas (entre ellos los arrecifes coralinos), las opciones para la adaptación pueden incluir la limitación de otras presiones (por ejemplo, la contaminación o la escorrentía de sedimentos).
- c. Las estrategias de largo plazo que podrían apoyar el proceso de adaptación de la biodiversidad se concentran en la expansión de reservas que podrían contribuir a disminuir la vulnerabilidad del ecosistema al cambio climático (McNeely y Schutyser, 2003) De este modo, es necesario mantener y desarrollar áreas naturales protegidas, corredores naturales, conservación del suelo, manejo de ecosistemas, monitoreo y conservación *in situ* (Lovejoy y Hannah, 2005). Así, es necesario restaurar y mantener una mayor conectividad ante el cambio climático lo que implica mantener corredores biológicos como una prioridad.
- d. Asimismo, es necesario reducir y manejar el *stress* de especies y ecosistemas, asociado a factores distintos al cambio climático tales como la fragmentación, destrucción, sobreexplotación, eutroficación, desertificación y acidificación (Inkley *et al.*, 2005, Duraiappah *et al.*, 2005, Robinson *et al.*, 2005, Worm *et al.*, 2006) del medio ambiente.
- e. La creación de mercados de servicios ambientales debería considerarse como una estrategia de producción en áreas naturales, sobre todo aquellas en las que la producción de bienes o servicios con mercado es de valor marginal.
- f. Una política de impuesto sobre el valor agregado ecológico podría contribuir a la conservación de bosques y biodiversidad (Veiga *et al.*, 2006). El impuesto recompensa a los gobiernos locales por su compromiso de proteger los recursos forestales y biológicos. Ello se puede asociar con el aumento considerable que ha habido en la cantidad y extensión de las áreas protegidas en los Estados.
- g. Manejar mejor el portafolio de políticas públicas ambientales (Constanza *et al.*, 2000), prefiriendo aquellas más costo-efectivas y que los responsables sociales participen activamente en ellas.
- h. Asimismo, es necesario la investigación para mejorar la identificación de factores clave que influyen en las estructuras que determinen la funcionalidad y provisionamiento de la biodiversidad conjuntamente con información cuantitativa de impactos económicos, a niveles más desagregados e incorporando una mayor cantidad de servicios ecosistémicos.
- i. El valor económico actual de la biodiversidad dificulta establecer una política de conservación basada exclusivamente en políticas de precios y debe por tanto aplicarse también regulaciones que aseguren la conservación. En este contexto, destaca la necesidad urgente de aplicar estas regulaciones para preservar algunas especies o hábitats en peligro de extinción tales como los corales o especies emblemáticas como la vaquita marina.
- j. Los impactos del cambio climático sobre la biodiversidad deben conceptualizarse en una visión más amplia y por tanto entender la necesidad de vincular la preservación a un manejo sustentable de los recursos.

### 3.5. EVENTOS EXTREMOS: HURACANES Y ENOS

#### Puntos fundamentales

La evidencia disponible a nivel internacional muestra que existe una correlación entre aumentos de la temperatura de superficie del mar (TSM) y un aumento de la máxima intensidad potencial que un huracán pueda alcanzar. En el caso en que la TSM está por encima de los 28°C, y aumenta alrededor de 3°C, es potencialmente posible un incremento de las velocidades de viento de las tormentas de entre 15% a 20% (Stern 2007). Ello sugiere que los costos de las tormentas se elevarán al cubo con respecto a la velocidad del viento (Stern, 2007). Por desgracia, con la información disponible en México es muy difícil desagregar entre los efectos de las tormentas generales y aquellos efectos originados específicamente por el cambio climático.

Sin embargo, las proyecciones de cambios en la intensidad de los huracanes basadas en un aumento exclusivamente de la TSM no son del todo precisas pues es necesario tomar en cuenta factores dinámicos como son la cizalla en los vientos, la cantidad de humedad en la tropósfera y la actividad de perturbaciones que generan huracanes. En este sentido, la actividad de intensidad de los huracanes no solo depende de la TSM. La mayoría de los modelos del clima usados por el IPCC (2007) no tienen suficiente resolución espacial como para generar huracanes, por lo que los cambios en la actividad de estos fenómenos debe ser inferida a partir de relaciones estadísticas o de modelos de alta resolución espacial. Son pocos los experimentos de cambio climático realizados con modelos de alta resolución espacial por lo que los resultados no son tan robustos. En el caso de México, las condiciones en el Atlántico y en el Pacífico son claves para determinar la actividad de huracanes. Un Atlántico anómalamente cálido incrementa la actividad e intensidad de huracanes en el Caribe y Golfo de México. Por otro lado, un Pacífico tropical del este con condiciones anómalamente cálidas, con condiciones tipo El Niño, inhibe la actividad de huracanes en el Caribe y Golfo de México. Las proyecciones de cambio climático generadas por el IPCC indican entonces que existirá un Atlántico tropical más cálido y condiciones tipo El Niño más frecuentes. Por ello, no es fácil determinar qué efecto dominará y en consecuencia, cómo cambiará la actividad de huracanes en el Caribe y Golfo de México. Complicaciones similares existen para el caso de los huracanes en el Pacífico mexicano.

Los huracanes, tormentas tropicales, tifones y ciclones tienen efectos en la infraestructura, la agricultura, la silvicultura y en la vulnerabilidad ambiental. La evidencia para México muestra que existen algunos patrones regulares de los impactos de las tormentas tropicales.

Las entidades federativas que concentran el mayor número de eventos son: Baja California Sur; Sinaloa; Quintana Roo; Tamaulipas y Veracruz. En total, estas entidades recibieron el 63% de las tormentas tropicales y huracanes que ingresaron al país. De esta forma, con base a la intensidad y duración de los eventos extremos se identificaron 25 municipios con una mayor vulnerabilidad. La vulnerabilidad y el riesgo ante tormentas tropicales y huracanes futuros indican que los esfuerzos deben centrarse sobre estos 25 municipios donde existe una mayor probabilidad de que continúen ocurriendo estos eventos. Los costos económicos estimados han alcanzado el 0.59% del PIB, durante la peor estación de huracanes en el 2005. Debe destacarse que no se incluyen los costos potenciales de las muertes por huracanes, aunque como resultado de la puesta en marcha del Sistema de Alerta Temprana (SIAT) ante Huracanes desde el año 2000, prácticamente no existen fallecimientos como consecuencia directa de la entrada de huracanes a territorio mexicano.

El fenómeno meteorológico El Niño (y La Niña) son una manifestación de la interacción entre la superficie del océano y la atmósfera, que se manifiesta como un aumento de la temperatura de superficie del mar en el Pacífico tropical, lo que ocasiona cambios en los patrones globales de circulación y consecuentemente de las lluvias. Es esta interacción entre el mar y la atmósfera la que produce gran parte de las alteraciones en los regímenes normales de temperatura y precipitación que se registran de un año a otro, afectando así en mayor o menor medida las actividades humanas. México está rodeado por mares cálidos, lo que permite la formación de huracanes en océano Atlántico y en el Pacífico año tras año. Sin embargo, El Niño y La Niña no presentan una periodicidad, por lo que para su monitoreo se han establecido grandes redes de observación (boyas, satélites, barcos, etc.). Los cambios interanuales en las condiciones climáticas provocan en México que las actividades agrícolas se vean afectadas por grandes variaciones en la precipitación. El Niño favorece una disminución en las lluvias de verano en casi todo el territorio, mientras que La Niña tiene un efecto casi opuesto. El Niño sin embargo, favorece lluvias de invierno más intensas mientras que La Niña reduce las lluvias invernales, principalmente en el norte del país. Vale la pena mencionar que bajo ciertas condiciones La Niña favorece lluvias intensas en la zona del Istmo de Tehuantepec, Tabasco y Chiapas. Tal condición se presentó en 1999 y en 2007. En ambos casos las inundaciones tuvieron efectos muy negativos en Tabasco. Aunque se conoce bastante sobre la forma en que impacta El Niño o La Niña en México, con resultados económicos significativos, resulta aun muy complejo proyectar sus impactos para el presente siglo con cierto grado de certidumbre.

La evidencia del sector agrícola muestra que la razón de superficie cosechada a superficie sembrada presenta un efecto de volatilidad condicional significativa. Este comportamiento puede asociarse al impacto generado por los eventos extremos asociados al cambio climático y sugiere que existe un impacto de los eventos extremos en la agricultura mexicana.

Nota: ENOS es un fenómeno oceánico-atmosférico que consiste en la interacción de las agua superficiales del océano Pacífico tropical con la atmósfera circundante y con la atmósfera global. La mayoría de los datos oceánicos a nivel internacional están referidos en las zonas. (N: norte, S: sur, O: oeste, E: este; ° grados: 1° equivale a 110 kms).

## 1. INTRODUCCIÓN

Una de las manifestaciones del cambio climático es el derretimiento de los polos y las cumbres nevadas, así como el ascenso del nivel medio del mar (IPCC, 2007). Por estas razones, dentro de los distintos escenarios de emisiones de GEI y calentamiento global (IPCC, 2007), las zonas costeras y los deltas siempre aparecen como regiones de alta vulnerabilidad. En efecto, el gradual ascenso térmico hace que las masas oceánicas se expandan y que las depresiones y tormentas adquieran intensidades y duraciones que potencialmente las convierten en huracanes con fuerzas destructivas (3, 4 y 5 en escala Saffir-Simpson) cuyos costos sociales, económicos y ambientales podrían ser significativos. Los impactos del cambio climático puede también observarse a través de fenómenos climáticos específicos tales como El Niño y, por el otro lado, La Niña. En este sentido, una de las preocupaciones centrales se relaciona con la prevención y/o disminución de los daños presentes y futuros que tales eventos hidrometeorológicos extremos pudieran causar a la población, a su patrimonio, a la infraestructura pública, a las actividades productivas, así como sobre diversos ecosistemas terrestres, costeros, marinos e insulares.

México cuenta con 11,122 kilómetros de litoral costero y una superficie insular de 5,127 km<sup>2</sup>. Este frente marino corresponde al litoral de 17 entidades federativas con sus 153 municipios costeros donde habita actualmente poco más del 15% de la población total nacional (INEGI, 2006). Su exposición geoclimática a la ocurrencia de tormentas tropicales y huracanes lo colocan en una situación de vulnerabilidad considerable, al tiempo que los asentamientos humanos y sus actividades productivas *in situ* elevan su nivel de riesgo. No obstante, tanto su vulnerabilidad como su riesgo están diferenciadamente distribuidos en ambos litorales costeros. Dado que resulta imposible evitar la ocurrencia de tormentas y huracanes, y dados los escenarios aludidos de su probable mayor intensidad relativa<sup>51</sup>, conviene estimar sus costos potenciales económicos, ello con el propósito de evitarlos o de reducirlos en la medida de lo posible. En este sentido, el principal objetivo de este capítulo es estimar tales costos potenciales del incremento de los huracanes y establecer los impactos de El Niño en el caso de México, identificando las zonas de impacto y los sectores económicos más sensibles, particularmente en el sector agropecuario.

## 2. VULNERABILIDAD Y RIESGOS EN MÉXICO

El calor contenido en los océanos y el vapor de agua han aumentado en los últimos decenios; estos dos factores contribuyen a un potencial de mayor intensidad de ciclones tropicales (Hansen *et al.*, 2005). Los océanos del mundo han absorbido alrededor de 20 veces más calor que la atmósfera durante el último medio siglo, dando lugar a temperaturas más altas no sólo en las aguas superficiales (por ejemplo, las profundidades de menos de 100 pies), sino también a gran profundidad (Barnett *et al.*, 2005 Levitus *et al.*, 2005). Conforme se produce el calentamiento, los océanos se amplían y se eleva el nivel del mar, lo que ha llevado a un aumento en el nivel del mar global (Leuliette *et al.*, 2003).

Los ciclones tropicales generan fuertes vientos que mezclan las aguas superficiales del océano con las aguas frías profundas (Emanuel, 2006). Esta agua normalmente fría sirve para debilitar una tormenta, sin embargo, en caso de que las aguas más profundas se vuelvan demasiado calientes, este mecanismo natural de frenado pierde potencia. Por ejemplo, datos del huracán Katrina indican que, aunque la temperatura superficial del mar fue suficientemente alta para mantener el huracán a lo largo de toda su trayectoria, la tormenta se intensificó notablemente cuando llegó a las pozas de agua caliente en el Golfo de México (Scharoo, 2005).

<sup>51</sup> Special Report on Emissions Scenarios (SRES, 2000).

El consenso generalizado acerca de la correlación positiva existente entre el incremento de la temperatura promedio del planeta, el ascenso en el nivel del mar y la mayor intensidad esperada de los huracanes, se traduce en el caso mexicano en los siguientes aspectos:

- Se espera que, al 2030, la temperatura de superficie tanto del Pacífico Norte, Centro y Sur, así como del Golfo de México y el Mar Caribe aumente entre 1 y 2°C en promedio. Un aumento de 1.5° C puede llevar a huracanes de alrededor de un 16% más intensos que la media, alcanzando velocidades de viento similares a los registrados por Wilma y con olas de hasta 14 metros sobre el nivel del mar (INE, 2007).
- De acuerdo con información difundida por el Instituto Goddard de Estudios Espaciales de la NASA, los pronósticos de incremento de temperatura de la atmósfera y de las masas oceánicas hará que las marejadas y oleajes intensos erosionen playas vulnerables como las de la península de Yucatán, donde se estima que durante la segunda mitad del siglo XXI podría elevarse el nivel medio del mar (Schmidt, 2007).
- Sin referir específicamente datos para México, recientemente se ha planteado que, hasta ahora, los modelos geoclimáticos que correlacionan temperatura y nivel del mar han subestimado las tendencias de esta última variable, y que en realidad el ascenso medio en el nivel del mar derivado del calentamiento global del planeta podría ser aun más significativo al proyectado anteriormente al 2100 (Ramhstorf, 2008). Ello desde luego incidirá en la biodiversidad, el uso de suelo y las actividades costeras.

Los efectos de los ciclones tropicales son diversos, e involucran daños a la infraestructura, la agricultura y la silvicultura (se sintetizan en el Cuadro 91) y tienen importantes repercusiones en la vulnerabilidad ambiental. Así, en los 153 municipios con litoral costero actualmente habitan alrededor de 16 millones de personas; no obstante, el número de localidades y asentamientos humanos se amplía al considerar otros municipios y regiones vecinas y/o cercanas a las influencias climáticas de tales ambientes costeros. En todo caso, en este estudio se consideran los 153 municipios costeros como universo estadístico y, a partir de allí, se selecciona la muestra más representativa de los mismos, en términos de la vulnerabilidad registrada ante la ocurrencia de tormentas tropicales y huracanes (y sus lugares específicos de entrada en tierra) durante el periodo 1970-2006. De acuerdo con información de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA 2007, CONAGUA 2008), durante el periodo mencionado han llegado a México 196 tormentas tropicales y huracanes, 191 se registraron en municipios costeros y 5 en el municipio de Ciudad Acuña, Coahuila.

## CUADRO 91. TIPOS DE EFECTOS POR HURACANES Y TORMENTAS TROPICALES

Geomorfológicos y ecológicos	Infraestructura	Agricultura y silvicultura
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vientos de gran fuerza, arrachados y constantes</li> <li>• Inundaciones (por lluvia y engrosamiento y desborde de cauces)</li> <li>• Deslizamientos de laderas</li> <li>• Avalanchas</li> <li>• Erosión de suelos</li> <li>• Sedimentación de ríos</li> <li>• Daño en arrecifes de coral</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Daños a edificaciones</li> <li>• Interrupción, rotura y caída de líneas de distribución, en particular aéreas</li> <li>• Daños a puentes y carreteras por deslizamientos y deslaves</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pérdida de cobertura vegetal, caída de árboles, daños a las siembras y cosechas, especialmente de gramíneas</li> <li>• Erosión afecta cosechas de raíces y tubérculos</li> <li>• Cambios en los sistemas de drenaje, naturales y artificiales</li> <li>• Sedimentación, salinización</li> <li>• Contaminación y erosión de tierras</li> </ul>

Fuente: Frederick (1983)

Las entidades federativas que concentran el mayor número de eventos son: Baja California Sur, Sinaloa, Quintana Roo, Tamaulipas y Veracruz. En total, estas entidades recibieron el 63% de las tormentas tropicales y huracanes que ingresaron al país.

En relación con la duración mínima, máxima y promedio de cada uno de estos 19 eventos extremos, medida en número de días (duración que junto con la intensidad se correlaciona positivamente con los mayores daños y costos por huracán padecido), muestra que no ha habido modificaciones sustanciales a este respecto aunque quizá un ligero aumento (Cuadro 92). De hecho, la información disponible indica que la velocidad de los vientos tropicales son una función exponencial de la temperatura y que un aumento de 3 grados de temperatura generará un incremento de las velocidades de viento de las tormentas de entre 15% a 20% (Stern, 2007). Ello sugiere que los costos de las tormentas se eleven al cubo con respecto a la velocidad del viento (Stern, 2007). Por desgracia, con la información disponible en México es muy difícil desagregar entre los efectos de las tormentas generales y aquellos efectos tradicionales originados en el cambio climático.

### CUADRO 92. DURACIÓN DE INTENSIDAD DE HURACANES

19 huracanes más intensos:	Duración mínima	Duración máxima (número de días)	Duración promedio
2000-2007 (6)	5	12	8,6
1990-1999 (2)	5	13	9
1980-1989 (4)	6	13	10
1970-1979 (7)	2	12	6,8

De esta forma, con base a la intensidad y duración de los eventos extremos se identificaron 25 municipios mayormente vulnerables. La vulnerabilidad y el riesgo ante tormentas tropicales y huracanes futuros, indica que los esfuerzos deben centrarse sobre estos 25 municipios y estar preparados para atender estas emergencias, al menos, durante 13 días por evento.

### 3. ASENTAMIENTOS HUMANOS Y ACTIVIDADES ECONÓMICAS PRINCIPALES

Más de 4, 273,000 habitantes residen en los 25 municipios con mayor vulnerabilidad y riesgo de sufrir tormentas tropicales y huracanes. Su patrimonio inmobiliario más significativo se estima en más de 1, 037, 000 viviendas particulares habitadas (sean propias o alquiladas<sup>52</sup>). Asimismo se calcula que la producción en riesgo de estos municipios es de 977,662 dólares en el sector agrícola, 459,677 dólares de producción pecuaria y de 2,905, 553 dólares en actividades turísticas (Cuadro 93).

La identificación de los municipios (y sus regiones) de mayor vulnerabilidad y riesgo ante las consecuencias esperadas del cambio climático permite dimensionar la importancia estratégica que tienen los procesos de adaptación en términos demográficos y económicos y el fortalecimiento institucional y presupuestal de lo que debiera ser una nueva política de prevención y reducción de daños y costos potenciales dada la actual densidad poblacional y el uso económico preferente que se le da a dichos territorios.

<sup>52</sup> Se supone que son propiedades privadas.

La conservación de arrecifes coralinos, manglares, otros humedales costeros y diversos ecosistemas propios de la interfase marino-costera se convierten, ahora más que nunca, en imprescindibles barreras naturales de contención ante las tormentas tropicales y huracanes futuros. Esta debe ser una prioridad no sólo ecológica sino socio-económica del conjunto de políticas públicas para enfrentar los escenarios del calentamiento global *in situ*, así como para impulsar nuevas formas de desarrollo regional mediante la complementación de acciones de mitigación/adaptación.

### CUADRO 93. LOS 25 MUNICIPIOS COSTEROS MEXICANOS DE MAYOR VULNERABILIDAD Y RIESGO ANTE HURACANES: COSTOS SOCIALES Y ECONÓMICOS POTENCIALES

	Población (habitantes)	Viviendas particulares habitadas	Agricultura	Ganadería	Turismo
			(en miles de dólares)		
<b>Pacífico norte y centro – sur</b>	<b>2509,458</b>	<b>613,180</b>	<b>798,724</b>	<b>355,827</b>	<b>1,183,858</b>
1 La Paz , BCS	219,596	55,445	70,105	10,411	40,582
2 Mulegé, BCS	52,743	13,555	90,327	18,390	sd
3 Los Cabos, BCS	164,162	40,866	8,341	5,246	422,096
4 Comondú, BCS	63,83	16,387	69,418	14,634	sd
5 Ahome, SIN	388,344	93,944	290,733	41,011	0,595
6 Mazatlán, SIN	403,888	103,534	12,252	38,678	454,319
7 Elota, SIN	46,462	10,631	83,563	56,907	sd
8 El Rosario, SIN	47,394	11,629	32,031	4,629	sd
9 San Blas, NAY	37,438	10,085	39,118	55,619	sd
10 Lázaro Cárdenas, MICH	162,997	39,098	sd	7,308	sd
11 Acapulco, GRO	717,766	167,888	13,482	9,941	238,833
12 Tecpan de Galeana, GRO	57,848	14,74	63,042	14,972	sd
13 La Unión, GRO	25,230	5,922	24,835	14,972	sd
14 San Pedro Pochutla , OAX	38,798	8,191	1,214	14,972	sd
15 Pinotepa, OAX	6,703	1,423	0,263	22,949	sd
16 Salina Cruz, OAX	76,219	19,842	sd	17,211	sd
<b>Golfo de México y Mar Caribe</b>	<b>1,764,098</b>	<b>424,665</b>	<b>178,938</b>	<b>103,845</b>	<b>1,721,695</b>
17 Río Bravo, TAMPS	106,842	27,008	72,721	3,273	sd
18 Soto la Marina, TAMPS	22,826	5,874	8,856	25,146	sd
19 Tampico-Madero, TAMPS	496,969	134,471	sd	sd	12,853
20 Tuxpan, VER	134,394	34,957	1,180	16,999	sd
21 Telchac Puerto, YUC	1,626	0,449	sd	45,906	sd
22 Benito Juárez, Q.R	572,973	123,687	9,567	1,759	1415,825
23 Tulum, Q.R	135,512	27,312	0,210	0,468	10,145
24 Cozumel, Q.R	73,193	18,318	0,003	0,078	255,147
25 Othón P. Blanco, Q.R	219,763	52,589	86,401	10,216	27,725
<b>Totales</b>	<b>4273,556</b>	<b>1037,845</b>	<b>977,662</b>	<b>459,672</b>	<b>2,905,553</b>

Fuentes: INEGI, México y sus Municipios 2008 (Con información del II Censo de Población 2005), SAGARPA-SIAP, Estadísticas agropecuarias 2007 y Sectur

■ Municipios de alto riesgo por registrar tanto una significativa frecuencia de tormentas tropicales y huracanes como de huracanes más intensos.

Los costos agregados por año ocasionados por eventos hidrometeorológicos se presentan en el Cuadro 94. Ello permite observar que los años 1998, 1999 y 2002 presentaron fuertes costos, representando más del 0.10% del PIB; asimismo que el peor año en términos de costos de eventos hidrometeorológicos fue el 2005, con un costo que representó el 0.59% del PIB. En este sentido, es necesario instrumentar planes de contingencia para reducir estas pérdidas atendiendo especialmente a las zonas de vulnerabilidad.

## CUADRO 94. COSTOS POR EVENTOS HIDROMETEOROLÓGICOS (MILLONES DE PESOS CORRIENTES)

Año	Costos de huracanes	PIB	Porcentaje
1997	900.9	2,873,273.0	0.03
1998	6,624.2	3,517,781.9	0.19
1999	5,067.2	4,206,742.9	0.12
2000	891.9	4,983,517.7	0.02
2001	2,361.9	5,269,653.6	0.04
2002	10,457.1	5,734,645.8	0.18
2003	3,330.2	6,245,546.9	0.05
2004	438.0	6,964,058.6	0.01
2005	44,257.2	7,466,438.0	0.59
2006	3,977.2	8,191,341.3	0.05

Fuente: Elaboración propia con datos de CENAPRED

Así, el conjunto de la evidencia sugiere la vulnerabilidad del país ante la presencia de huracanes más intensos debido a la mayor temperatura superficial de los mares y a la expansión o distensión de las masas oceánicas con oleajes de mayor fuerza y altura. En este sentido, resulta indispensable instrumentar políticas de adaptación.

### 4. EL NIÑO Y LA OSCILACIÓN SUR (ENOS) Y LA NIÑA

El Niño/Oscilación Sur (ENOS) es ciertamente un fenómeno complejo. En forma directa, el término de El Niño se refiere al calentamiento de las aguas del Océano Pacífico Oriental y a la Oscilación Sur donde se observa una diferencia entre la presión atmosférica en el Pacífico Central y el Pacífico Occidental en latitudes tropicales. Las manifestaciones del ENOS son particulares de cada zona, pero algunas características son “naturales” a lo largo del globo y en donde destacan:

- La significativa elevación de la temperatura superficial del mar (TSM) como consecuencia de la incursión en el litoral peruano–ecuatoriano de la gigantesca masa de aguas cálidas que llega desde el Pacífico Occidental.
- Incremento de las precipitaciones en esa zona estrechamente vinculada con el incremento anómalo de la temperatura superficial del mar.
- El aumento significativo de la descarga de los ríos.
- La elevación del nivel de mar en las costas tropicales sudamericanas.

Como parte del ENOS, se presenta La Niña, que se caracteriza por anomalías negativas en la TSM del Pacífico Ecuatorial del este, es decir corresponde a la fase fría. Las consecuencias de La Niña al clima global, además de las temperaturas frías en el mar son las siguientes:

- Trae consigo una gran productividad de la fauna marina y periodos de abundantes lluvias en el continente americano.
- En los trópicos, las variaciones son radicalmente opuestas a las ocasionadas por El Niño. En el continente americano, las temperaturas del aire de la estación invernal, se tornan más calientes de lo normal, en el sudeste y más frías que lo normal en el noreste.
- En América del Sur, predominan condiciones más secas y más frescas que lo normal sobre Ecuador y Perú; así como condiciones más húmedas que lo normal en el noreste de Brasil.



- En América Central, se presentan condiciones relativamente más húmedas que lo normal, principalmente sobre las zonas costeras del mar Caribe.
- En México, provoca lluvias a veces excesivas en el centro y sur del país e inviernos con marcada ausencia de lluvias.

De acuerdo a la Comisión Nacional del Agua entre 1970 y 2006 se han presentado 37 huracanes en el océano Pacífico y 19 en el lado del Atlántico. Este mayor número de huracanes en el Atlántico aumenta las posibilidades de que toquen territorio mexicano incrementando las lluvias de verano. La disminución de huracanes en el Golfo de México, afecta principalmente las lluvias del norte de Veracruz, Tamaulipas y Coahuila. Son tan importantes los huracanes en las lluvias del noreste, que un sólo huracán puede significar el fin de una sequía. Ello parece coincidir con ciertas predicciones que establecen que en una atmósfera más caliente, como aquella que se tendría bajo el calentamiento global, los huracanes serían más intensos. Es necesario aclarar que el impacto positivo en cuanto a lluvias, que se asocia a huracanes, dependerá de las trayectorias que estos siguen. Algunos huracanes en el Golfo de México que no se acercan a la parte continental, simplemente remueven humedad atmosférica del continente y la llevan a regiones oceánicas, alejando la posibilidad de lluvias de verano en México. Por ello, no es inmediata una conclusión sobre el efecto que más huracanes podrían tener en el Caribe y Golfo de México.

En México, en el periodo 1982-83, se produjo con El Niño un evento muy intenso que provocó sequías, incendios forestales y pérdidas cuantiosas en la agricultura (Cuadro 95 y 96). Durante el periodo 1991-1994, se estableció El Niño, que si bien no fue tan fuerte, resultó en una de las sequías más prolongadas en el norte de México, que ocasionó en el sector ganadero pérdidas económicas significativas asociadas fundamentalmente a la muerte de cabezas de ganado. Algunas estimaciones de la NOAA en los Estados Unidos de Norteamérica sugieren que El Niño 1982-83 provocó daños directos a la economía mexicana por más de 500 millones de dólares. Algunos estudios indican que los costos del evento El Niño en 1997-98 alcanzaron los 2 mil millones de dólares (Magaña, *et al* 1999), por los impactos en agricultura, pesca, bosques, y desastres de origen hidrometeorológico.

## CUADRO 95. EFECTOS DE LA SEQUÍA DE 1970-2000

Año	Mes	Área geográfica afectada	Efectos económicos y sociales
1970	mayo	Nacional	Se buscó dar empleo a los desempleados en las zonas afectadas
1976	abril	Norte: Durango	Mil millones de pesos se perdieron en el último ciclo agrícola debido a las sequías y heladas. Se dejaron de cosechar mil toneladas de frijol y 75 mil de maíz
	mayo	Norte: Durango, Coahuila y Comarca Lagunera	En la Comarca Lagunera las presas tienen volúmenes bajísimos de agua. Durango carece de agua potable
1996	mayo	Norte: Coahuila	Unas 60 mil cabezas de ganado murieron en Coahuila en los últimos seis meses debido a la sequía que afectó al estado, sobre todo la parte norte y fronteriza
	julio	Noroeste: Sonora	Pérdidas por \$200 millones de pesos en la ganadería debido a la escases de lluvia en el estado de Sonora



## CUADRO 95. EFECTOS DE LA SEQUÍA DE 1970-2000 (CONTINUACIÓN)

Año	Mes	Área geográfica afectada	Efectos económicos y sociales
1999	marzo	Durango	El 20% de la áreas frutícolas afectadas, agotados los mantos freáticos obligó a las autoridades a provocar lluvia con bombardeo de nubes
		Nuevo León	Se perdieron los cultivos de 3,500 ha.
		Sinaloa	Tras 5 años de sequía se perdieron 4 mil ha de árboles frutales en el municipio de Nuevo Leal
		Sonora	Grandes estragos en agricultura y ganadería, la peor en 30 años; las presas en el sur del estado al 20% de su capacidad
	abril	Sinaloa	El estado fue declarado zona de desastre al dejar de sembrarse 120 mil ha., las presas se encontraron al 10% de sus capacidades y sólo se garantizó abastecimiento para 30 días
		Sonora	Cuarta sequía consecutiva, 60 mil cabezas de ganado pérdidas, en el pueblo de Batuc y de San Pedro de la Cueva
		Sureste de Coahuila	Se perdieron 4 mil ha. de tierras de temporal
	mayo	Aguascalientes	El estado fue declarado zona de desastre
		Coahuila	Murieron 4,500 reses y 1,500 ha permanecieron sin cultivo
		San Luis Potosí	El 80% de los problemas por sequía se encuentra en 15 municipios
		Sinaloa	Plan emergente para reducir horas de servicio de agua a 25 mil usuarios
		Sonora	Emergen las ruinas de un pueblo en San José de Gracia que en 1928 quedó sumergido en las aguas de la presa Plutarco Elías Calles por la sequía
	junio	Sonora	Murieron por la sequía 10 mil reses en Hermosillo, 15 ganaderos afectados, 200 millones de pesos en pérdidas. Presa La Amistad al 23% de su capacidad. La sequía provocó un brote de hepatitis en la periferia del Estado
	agosto	Sureste y Norte de Zacatecas	182 mil ha de frijol y maíz destruidas, así como 150 cabezas de ganado muertas. 28 municipios abandonados por la sequía y 80 mil campesinos en mayor pobreza
octubre	Coahuila	Pérdidas en 30 mil ha de cultivos de maíz y frijol	
	Nayarit	Cuando menos el 25% de la superficie cultivada de maíz en la zona serrana del municipio de El Nayar se perdió	
noviembre	Durango	El sector ganadero perdió \$50 millones de pesos y la muerte de 1,000 cabezas de ganado	

Fuente: CENAPRED. Reseña histórica de las sequías en México y en otras partes del mundo

## CUADRO 96. AFECTACIÓN DE LA SEQUÍA EN MÉXICO

Tipo de sequía	No. de municipios	Área afectada		Población afectada	
		Km <sup>2</sup>	%	No. Hab.	%
Severa	195	573,300	29	9,913,699	10
Media	408	712,800	37	21,478,004	22
Baja	572	81,620	4	6,764,556	7

Fuente: CENAPRED (2001)

Las zonas de impacto de El Niño en los mares mexicanos parecen ser más claras en el Pacífico, resultando en cambios en la estructura y dinámica de los mismos, que alteran el clima y las actividades pesqueras regionales. Los efectos directos de El Niño, en términos monetarios, significaron una pérdida de aproximadamente 700 millones de pesos, asociado a los volúmenes de pesca que dejaron de capturar las embarcaciones costeras.

Las sequías tienen también costos significativos. Por ejemplo, el área afectada en sequía baja es de alrededor de 4% y hasta el 37% cuando es media. El monto de pérdidas por sequías en el sector ganadero puede ascender en épocas extremas hasta 10 mil cabezas de ganado. Dada la escasez de precipitaciones, las presas pueden presentar un cuarto de su capacidad, mientras que en Estados donde se presentan huracanes se pueden desbordar ocasionando pérdidas materiales cuantiosas y vidas humanas. La presencia de corrientes de agua más caliente de lo normal durante El Niño provoca la migración de especies regionales, como las de origen tropical que pueden encontrarse en mares de América del Norte. En el Golfo de California, El Niño provoca el rompimiento de la cadena alimentaria y una drástica disminución de la población de especies de alto valor comercial, por ejemplo, se produce una baja en la captura de sardina y calamar gigante.

Por último, expertos de la Organización Panamericana de la Salud (OPS) consideran que las inundaciones y sequías asociadas al fenómeno de El Niño tendrán su impacto en la salud, incluyendo el incremento de enfermedades infecciosas, la reducción de los suministros de agua, la disminución de la producción agrícola y pesquera, lo que a su vez conducirá a menos alimentos, al aumento de los niveles de contaminación y a una mayor cantidad de desastres. Las enfermedades transmitidas por alimentos pudieran incrementarse como resultado de la afectación de la refrigeración de alimentos y vacunas, debido a los cortes de energía eléctrica.

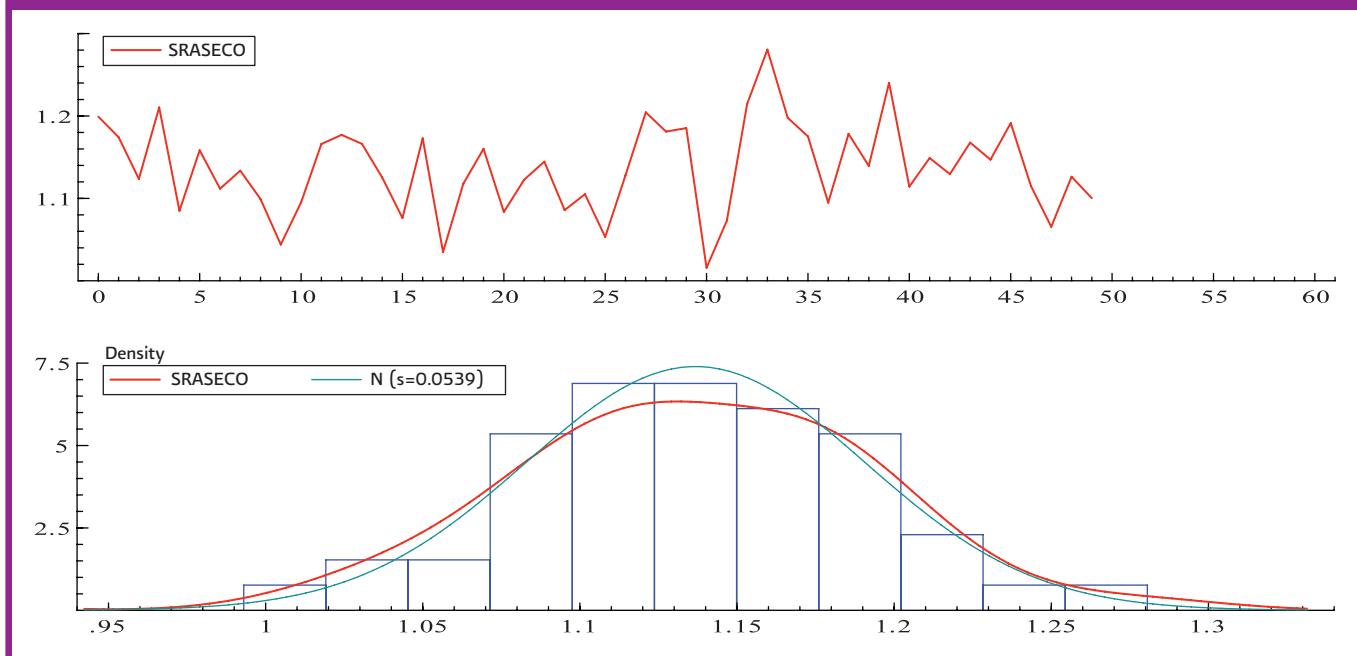
Así, la evidencia disponible sugiere costos económicos significativos por estos fenómenos aunque aun es difícil de cuantificar y proyectar a futuro.

## 5. EVENTOS EXTREMOS EN LA DINÁMICA AGRÍCOLA

Los impactos del cambio climático a través de los eventos extremos son ciertamente múltiples. Estos impactos son particularmente importantes en el sector agropecuario y se reflejan en la razón de la superficie sembrada (SSEM) a superficie cosechada (SCOS) (esta variable se denominó RASECO, Peter y Yao, 2003). El modelo GARCH estimado que aproxima el comportamiento de la serie RASECO muestra la presencia de un proceso de volatilidad importante en el contexto de una reducción de esta relación. Ello confirma que los eventos extremos están incidiendo en la volatilidad de la razón de la superficie sembrada (SSEM) a superficie cosechada (SCOS). Este comportamiento puede asociarse entonces al impacto generado por los eventos extremos asociados al cambio climático. En este sentido, es posible argumentar que el cambio climático está incidiendo en forma creciente en los rendimientos agrícolas a través de los eventos extremos reduciendo la rentabilidad de las cosechas.

En efecto, la evidencia empírica indica, en la estimación del modelo ARCH/GARCH, la presencia de una cierta volatilidad condicional (Lamoureaux y Lastrapas, 1990). Sin embargo, la significancia estadística es débil lo que puede deberse a lo reducido del rango longitudinal de datos (*i.e.* 28 datos). Para hacer frente a este problema, se realizó un ejercicio de simulación de datos donde se tomó cuidadosamente en cuenta, las características de la función de masa de probabilidades de la variable RASECO (Peter y Yao, 2003). Esto es particularmente importante considerarlo pues evidentemente, la variable RASECO "original" es de valor extremo con una significativa asimetría positiva. La parametrización de esta función de masa de probabilidades se realizó utilizando una estimación de *Máxima Verosimilitud* con el programa matemático MATLAB. La simulación (Bollerslev y Ghysels, 1994) de 50 datos aleatorios se presenta en la Gráfica 96 en donde se observa este aumento de la volatilidad.

Gráfica 96. Función de Masa de Probabilidades de los Datos Simulados para RASECO



## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. La evidencia disponible a nivel internacional muestra que existe una fuerte correlación entre el incremento de la temperatura, un aumento de la intensidad de huracanes y de un alza del nivel de mar. Las consecuencias de ello, para México se concentran en los 153 municipios con litoral costero donde habitan alrededor de 16 millones de personas.
2. La evidencia disponible muestra que entre los 20 municipios más frecuentemente afectados y los 16 que han recibido los huracanes más intensos, se obtiene un total de 25 municipios que exhiben la mayor vulnerabilidad histórica de los 153 municipios costeros del país. Es en estos municipios donde se puede estimar los mayores costos económicos de una mayor cantidad o intensidad de huracanes. Por desgracia es muy difícil, con la información disponible, desagregar en los efectos de los huracanes aquellos que corresponden exclusivamente al cambio climático.
3. La evidencia presentada indica que los lugares específicos donde ingresaron a tierra tales tormentas tropicales y huracanes (puertos, pueblos, puntas, comunidades y/o ejidos) se concentran en 20 municipios costeros que, durante el periodo mencionado, recibieron un total de 107 eventos (56% del total de los 191). Se trata de 4 municipios de Baja California Sur, 4 de Quintana Roo, 3 de Sinaloa, 3 de Oaxaca, 2 de Tamaulipas, 2 de Guerrero, 1 de Veracruz y 1 de Michoacán. Es en esos municipios que deben, en principio, concentrarse los esfuerzos de adaptación reduciendo los riesgos inherentes a huracanes e inundaciones.
4. Los costos económicos estimados han alcanzado el 0.59% del PIB, en la peor estación de huracanes en el 2005, aunque este valor es muy variable para cada año. Debe destacarse que no se incluyen los costos potenciales de las muertes por huracanes ya que ellas no pueden atribuirse exclusivamente al cambio climático.

5. Las condiciones de El Niño y La Niña producen alteraciones en los regímenes normales de temperatura y precipitación, afectando así en mayor o menor medida las actividades humanas. Sin embargo estos fenómenos no presentan una periodicidad, por lo que para su detección se requiere de monitoreo constante y desarrollar modelos de pronóstico. Las dos fases del ENOS tienen en México impactos en las actividades agrícolas; en particular resultan los más afectados por extremos en la precipitación, por ejemplo, las sequías en la parte norte del territorio.
6. Las sequías tienen costos significativos. Por ejemplo, el área afectada en sequía baja es de alrededor de 4% y hasta el 37% cuando es media. El monto de pérdidas por sequías en el sector ganadero puede ascender en épocas extremas hasta 10 mil cabezas de ganado. Dada la escases de precipitaciones, las presas pueden presentar un cuarto de su capacidad, mientras que en Estados donde se presentan huracanas se pueden desbordar ocasionando pérdidas materiales cuantiosas y vidas humanas.
7. La presencia de corrientes de agua más caliente de lo normal durante El Niño provoca la migración de especies regionales, como las de origen tropical que pueden encontrarse en mares de América del Norte. En el Golfo de California, El Niño provoca el rompimiento de la cadena alimentaria y una drástica disminución de la población de especies de alto valor comercial, Por ejemplo, se produce una baja en la captura de sardina y calamar gigante.
8. Dentro de los efectos en la salud se observa que las inundaciones incrementan la aparición de enfermedades transmitidas por el agua.
9. La evidencia del sector agrícola muestra que la razón de superficie cosechada a superficie sembrado presenta una reducción paulatina y un efecto de volatilidad condicional significativo. Este comportamiento más volátil puede asociarse al impacto generado por los eventos extremos asociados al cambio climático. En este sentido, es posible argumentar que el cambio climático está incidiendo en forma creciente en los rendimientos agrícolas a través de los eventos extremos.

## RECOMENDACIONES

- a. La evidencia presentada muestra que los huracanes se concentran en algunas zonas costeras del país. De este modo, deben desarrollarse acciones específicas para reducir la vulnerabilidad de estas regiones. Por ejemplo, debe construirse una infraestructura para evitar y reducir los impactos de las inundaciones o de los impactos directos de los huracanes. El mantener el SIAT ante huracanes es una medida que reduce la vulnerabilidad de las personas a ciclones tropicales. Se deben diseñar otros tipos de SIAT ante tormentas severas, sequías, Nortes, etc.
- b. Asimismo, es necesario reducir la exposición de las actividades productivas a estos impactos en los municipios de mayor riesgo. Para ello es necesario modificar las vocaciones productivas de estas regiones y mejorar su administración de riesgos con seguros adecuados.
- c. Es necesario consolidar los mecanismos de respuesta ante eventos extremos.
- d. El nivel de organización institucional para alertar a reaccionar, responder y gestionar las catástrofes conduce a diferentes niveles y tipo de daño. Más importante aún, el nivel y la eficacia de los riesgos que enfrenta la infraestructura (física y financiera) lleva a diferentes niveles y tipos de impacto socioeconómico y ambiental.
- e. Es necesario mejorar las capacidades nacionales en materia de monitoreo de tiempo y clima, así como en la producción de pronósticos sustentados en principios físicos, que generen productos a la medida de las necesidades del usuario. La información de tiempo y clima debe estar acoplada a esquemas de toma de decisiones objetivos. En materia de riesgo hidrometeorológico se estima que la prevención resulta costo-efectiva lo que sugiere la importancia de desarrollar una estrategia de prevención.
- f. Es necesario mantener especial atención sobre la posible difusión de enfermedades contagiosas.

### 3.6. TURISMO Y DESASTRES NATURALES

#### Puntos fundamentales

El sector turismo es un pilar fundamental para el crecimiento económico de diversas regiones del país así como a nivel nacional y tiene, además, un impacto importante sobre los ecosistemas. Asimismo, la presencia de una causalidad bidireccional entre turismo y medio ambiente en años recientes se ha convertido en un tema de debate. En efecto, la relación entre el turismo y el cambio climático (CC) es bidireccional. En un sentido, el turismo impacta directamente en el ambiente con las emisiones de CO<sub>2</sub> que genera, particularmente el transporte y por los impactos que ocasiona en las áreas específicas. En el otro sentido, el cambio climático generará cambios en la temperatura, aumento en los eventos catastróficos como huracanes (Knutson y Tuleya, 2004), elevación en el nivel del mar, reducción en las áreas de nieve y en el uso de la tierra lo que modificará los patrones turísticos a nivel global.

Existe una relación de largo plazo en México entre el gasto en turismo internacional al país con respecto al PIB de Estados Unidos de Norteamérica, el tipo de cambio real, el índice Mexicano bursátil y la temperatura; ello indica que el cambio climático impactará a la demanda turística. Esto es, el turismo internacional responde negativamente con respecto a la variable climática; en particular, se observa que un aumento de la temperatura, que puede aproximar al crecimiento de los eventos extremos derivados del cambio climático, se traduce en una reducción del turismo. Por ello, es necesario diversificar la oferta turística hacia otras áreas que no estén sujetas a eventos extremos como las actividades de playa.

Los resultados de este modelo se confirman con el análisis impulso-respuesta, en donde los impactos de la temperatura afectan de manera negativa al turismo para los siguientes 100 períodos. Asimismo el análisis de riesgo indica que, bajo los diferentes escenarios climáticos, determinados por la variable temperatura y con un comportamiento simulado de la economía de Estados Unidos de Norteamérica, existe una menor probabilidad de que los niveles de gasto de los turistas contribuyan al desarrollo de la región y del país.

Para el 2100 los costos promedios oscilan entre el 0.18% y 0.025% del PIB con tasas de 0.5% y 4% respectivamente; bajo el escenario de mayor cambio A2.

## 1. INTRODUCCIÓN

El turismo internacional es una importante fuente de divisas para el país, sin embargo, por su naturaleza es muy sensible a ciertas variables como el tipo de cambio, el nivel de crimen y el clima. Así, el cambio climático es un factor que afecta directamente la demanda de este servicio. La relación entre el turismo y el cambio climático es bidireccional. En un sentido el turismo impacta directamente en el ambiente con las emisiones de CO<sub>2</sub> que genera, particularmente en el transporte. En el otro sentido, el cambio climático generará cambios en la temperatura, aumento en los eventos catastróficos como huracanes (Knutson y Tuleya, 2004), deshielos y cambios de uso de la tierra que modificarán radicalmente los patrones turísticos.

La estimación puntual de los efectos asociados al cambio climático (CC) es compleja porque requiere identificar los efectos adicionales asociados como son los huracanes. Así, más allá de conocer con exactitud los costos económicos de estos desastres naturales, en este caso se estima la sensibilidad del turismo internacional ante estos fenómenos. La evidencia internacional indica que el turismo es un factor clave en algunos países para generar empleos y obtener recursos para poder hacer inversiones que desarrollen la competitividad de la región. Dado esta característica, el turismo tiene grandes oportunidades para impulsar relaciones entre países y es visto como una oportunidad de desarrollo para regiones que están marginadas o que su actividad económica no es muy favorable y que tiene una gran cantidad de recursos para ser explotados con fines de recreación y entretenimiento. Por lo tanto el objetivo de este capítulo es conocer la sensibilidad del gasto de turismo internacional en México con respecto a tres variables macroeconómicas importantes como son el PIB de Estados Unidos de Norteamérica, el tipo de cambio real y el índice bursátil del país; además de estas variables se incluye como indicador ambiental a la temperatura.

## 2. EL TURISMO, EL CRECIMIENTO ECONÓMICO Y LOS DESASTRES NATURALES

El turismo es un elemento esencial para el crecimiento económico de algunos países o regiones. Este sector es una fuente generadora de empleos, de construcción y de infraestructura, además de ser una fuente importante de divisas. Efectivamente, la actividad turística genera sinergias al crecimiento del sector comercial y de servicios. La demanda potencial de los turistas, con destino a centros de esparcimiento, genera una demanda de transporte, alojamiento, recreación y entretenimiento que tiene efectos económicos positivos en las comunidades, en términos de infraestructura de transporte y comunicaciones, empleo y un aumento en el consumo (Prideraux, 1999). A nivel internacional, los ingresos por turismo se han multiplicado exponencialmente en cincuenta años ya que pasaron de 2,100 a 401,000 miles de millones de dólares en el año 2000 (UNWTO). Sin embargo, la demanda turística tiene una elasticidad importante respecto a la percepción de riesgo (González-Herrero y Pratt, 1998) por lo que los desastres naturales y otros impactos colaterales tienen un impacto significativo en el sector turístico.

La relación entre el turismo y el cambio climático es bidireccional. En un sentido el turismo impacta directamente en el ambiente con las emisiones de CO<sub>2</sub> que genera, particularmente el transporte y en mayor medida el transporte aéreo (Lipman, 2007 y UNWTO, 2008). En este sentido, el sector turístico deberá en el futuro de contribuir a minimizar sus emisiones mediante el fomento sostenible, con soluciones de transporte carbono-neutral, a fin de mejorar la utilización de los recursos naturales (agua, energía) y contribuir a la conservación de áreas naturales. En el otro sentido, el cambio climático generará cambios climáticos y eventos catastróficos como huracanes (Knutson y Tuleya, 2004) lo que impacta directamente al turismo. Ello debido a que la mayoría de los productos turísticos directamente incorporan algunas condiciones que son vulnerables al cambio climático, como los deportes de invierno, el sol y el mar y el ecoturismo. Los efectos del cambio climático y sus implicaciones en el turismo se sintetizan en el Cuadro 97.

Estos impactos potenciales pueden ser ciertamente significativos por lo que se requiere de políticas de adaptación y planificación para reducirlos al mínimo. Por ejemplo, hay ecosistemas que ya están bajo un estrés importante como los arrecifes de coral por lo que es necesario instrumentar planes de gestión en las zonas costeras. El patrimonio arquitectónico y la infraestructura puede ser afectado también por el cambio climático de diferentes maneras; la más evidente es el efecto directo del aumento en el nivel del mar sobre las estructuras que están cerca de la costa y que pueden ser inundadas o dañadas por la erosión costera y los eventos climáticos extremos. El patrimonio arquitectónico también puede verse afectado por el aumento de la velocidad del viento, ya sea a través de daños a techos, o mediante el aumento de la carga de viento en las paredes. Este último puede afectar negativamente a los edificios en ruinas, como monasterios o casas torre, muchas de las cuales se encuentran en lugares expuestos.

## CUADRO 97. PRINCIPALES EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO Y SUS IMPLICACIONES PARA LOS DESTINOS TURÍSTICOS

Impacto	Implicaciones para el turismo
Temperaturas más cálidas	Alteración de la estacionalidad, de estrés térmico para los turistas, costos de enfriamiento, cambio en las plantas y la vida silvestre, en poblaciones de insectos y su distribución, en enfermedades infecciosas
Disminución de la cubierta de nieve y de los glaciares	Falta de nieve en los destinos para la práctica de deportes de invierno, incremento de los costos, temporadas más cortas en los deportes de invierno, reducción de la estética del paisaje
Aumento de la frecuencia y la intensidad de las tormentas extremas	Riesgo para las instalaciones turísticas, aumento de los costos de seguro / pérdida de asegurabilidad, costos de interrupción de negocios
Reducción de las precipitaciones y aumento de la evaporación en algunas regiones	Escasez de agua, competencia por el agua entre el turismo y otros sectores, desertificación, aumento de incendios forestales que amenazan la infraestructura y que afectan a la demanda
Aumento de la frecuencia de fuertes precipitaciones en algunas regiones	Inundaciones, daños a la arquitectura histórica y cultural, daños a la infraestructura turística, alteración de la estacionalidad
Elevación en el nivel del mar	Erosión en costas, pérdida de área de playas; costos más elevados para proteger y mantener las fronteras marítimas
Incremento en las temperaturas de la superficie del mar	Incremento del blanqueamiento de coral y degradación de recursos marinos así como de la estética de destinos de buceo y snorkel
Cambios en la biodiversidad terrestre y marina	Pérdida de atractivos naturales y de especies destino, mayor riesgo de enfermedades en países tropicales-subtropicales
Incendios forestales con mayor frecuencia y de mayor impacto	Pérdida de atractivos naturales, incremento del riesgo de las inundaciones, daño a la infraestructura turística
Cambios del suelo (por ejemplo, niveles de humedad, la erosión y la acidez)	Pérdida de los bienes arqueológicos y otros recursos naturales con impactos sobre lugares de destino

Fuente: UNWTO (2008)

### 3. MARCO GENERAL SOBRE LA DEMANDA DE TURISMO INTERNACIONAL

Las funciones de demanda por servicios turísticos pueden especificarse como la demanda de cualquier otro bien. En este sentido, las funciones de demanda dependen de las preferencias individuales y de la restricción presupuestal, que se representan normalmente por el comportamiento de la población, del gasto total o ingreso, por los precios relativos y algunas variables de hábitos de consumo, factores institucionales y niveles de crimen y seguridad pública en general así como otros factores como el clima. De esta manera, las especificaciones empíricas más utilizadas de las funciones de demanda turística pueden representarse como (Johnson, y Ashworth, 1990, Sinclair, 1998, Song y Witt, 2000):

$$(23) \quad DTUR_t = F(POB_t, Y_t, P_{it}, P_{ot}, P_{st}, TC_t, GUS_t, SP_t, PUB_t, C_t)$$

Donde  $DTUR_t$  es la variable que captura la demanda turística respectiva,  $POB_t$  es el número de habitantes del país de origen o el estrato poblacional relevante,  $Y_t$  es el nivel de ingreso del país de origen utilizado como aproximación del gasto total,  $P_{it}$  es el nivel de precios en el destino turístico seleccionado,  $P_{ot}$  es el nivel de precios del país de origen,  $P_{st}$  es el nivel de precios de los destinos turísticos sustitutos relevantes,  $TC_t$  es el tipo de cambio nominal,  $GUS_t$  son las preferencias y gustos de los consumidores,  $SP_t$  es la seguridad pública en general y  $PUB_t$  es el gasto en publicidad<sup>53</sup>,  $C_t$  es el clima.

<sup>53</sup> Los gastos en promoción se consideran un factor importante que puede incidir en las participaciones en el mercado total. Sin embargo, se estima que estos gastos son normalmente más que compensados por el comportamiento del tipo de cambio y los diferenciales de precios relativos. En este sentido, se excluyeron estos efectos en las especificaciones finales utilizadas.

La influencia del cambio climático en los patrones de demanda del turismo será determinada entonces por la respuesta de los turistas a la complejidad de los impactos sobre los destinos. Existe evidencia que demuestra la importancia intrínseca de las condiciones meteorológicas y el clima para la toma de decisiones y la experiencia de vacaciones. El tiempo y el clima son de importancia universal en la definición de un destino atractivo y una motivación central en la selección de un destino de vacaciones y el calendario de viajes (Kozak, 2002, Gössling y Hall 2006, Hamilton y Lau 2005, Bigano *et al.*, 2006). También existen pruebas de que las condiciones climáticas experimentadas en el lugar de destino tienen una importante influencia en la satisfacción global de vacaciones y que por lo tanto sus modificaciones impactarán la demanda turística (UNWTO, 2008).

#### 4. DEMANDA DE TURISMO INTERNACIONAL: EVIDENCIA PARA MÉXICO

El sector del turismo en México ha mostrado un rápido desarrollo durante las últimas dos décadas asociado a una tendencia mundial a la expansión de esta actividad. El crecimiento de las actividades turísticas en México se ha traducido tanto en el desarrollo y consolidación de nuevos destinos de playa o ciudades coloniales como en el renovado interés por las visitas a ruinas arqueológicas o reservas naturales. La rápida expansión de este sector se ha traducido además en un aumento de su peso específico en el comportamiento general de la economía mexicana y por tanto en sus efectos sobre el nivel de vida de una buena parte de la población. México está situado entre dos océanos con dos extensas costas y cordilleras que favorecen por una parte atractivos sitios turísticos de playa y montaña, así como la ocurrencia de desastres naturales y la consecuente pérdida de infraestructura económica y de vidas humanas. Además, dadas las características geológicas, climáticas, meteorológicas y biológicas del país, los siniestros más frecuentes son los terremotos, las tormentas y huracanes, las inundaciones, la inestabilidad del suelo, los deslizamientos y los incendios forestales (Bitran, 2001).

La especificación econométrica aplicada para la demanda de turismo en México ( $GT_t$ ) esta en función del PIB de Estados Unidos de Norteamérica ( $YX_t$ ), del tipo de cambio real ( $SR_t$ ), del índice bursátil México ( $IM_t$ ) y de la temperatura media ( $TMP_t$ ):

$$(24) \quad gt_t = \alpha + \beta_1 * yx_t + \beta_2 * sr_t + \beta_3 * im_t + \beta_4 * tmp_t$$

Las pruebas de raíces unitarias de Dickey–Fuller Aumentada (ADF) (1981), de Phillips–Perron (PP) (1988) y de KPSS (1992) indican que todas las series son no estacionarias con orden de integración  $I(1)$ . De este modo, se realizó el procedimiento de cointegración de Johansen (1988, 1992 y 1995), sintetizado en el Cuadro 98, donde se observa que existe una relación de largo plazo que se presenta en la ecuación (25). En esta ecuación se observa que el efecto del PIB de Estados Unidos de Norteamérica tiene una elasticidad ingreso de 0.62, el tipo de cambio real de 0.23, además del índice bursátil y la temperatura tienen elasticidades de 0.15 y -0.27, respectivamente.



## CUADRO 98. ESTADÍSTICOS DEL PROCEDIMIENTO DE JOHANSEN PARA LA DEMANDA DE TURISMO

H <sub>0</sub>	Prueba de la Trazas	Valores Críticos (5%)	Prueba de la Raíz Característica Máxima	Valores Críticos (5%)
r = 0	163.8*	59.5	81.63*	30.0
r ≤ 1	82.21*	39.9	46.73*	23.8
r ≤ 2	35.48*	24.3	28.73*	17.9
r ≤ 3	6.749	12.5	6.322	11.4
r ≤ 4	0.427	3.8	0.427	3.8

Notas: (\*) Indica rechazo de la hipótesis nula. Número de rezagos en el VAR = 3. El modelo VAR incluye las variables sin restringir: d91 (dummy 1991) y d96 (dummy 1996). Período: 1983-2005.

$$(25) \quad gt_t = 0.570* yx_t + 0.461* sr_t + 0.028* im_t - 0.136* tmp_t$$

El modelo de corrección de errores (Engle y Granger, 1987, Hendry, 1995) (ecuación (26)) muestra una alta capacidad de simular el comportamiento histórico turístico internacional (Gráfica 97):

$$\Delta gt_t = 1.375*\Delta yx_{t-1} + 0.296*\Delta sr_{t-2} - 0.665*\Delta tmp_{t-2} - 0.047*ecm_{t-1} - 0.283*d85$$

(4.306)
(7.338)
(-1.358)
(-3.425)
(-10.122)

$$(26) \quad + 0.101* d91 + 0.250* d95 - 0.086* d99$$

(4.121)
(8.969)
(-7.336)

Pruebas de diagnóstico:

R<sup>2</sup>: 0.958

Normalidad J-B: 1.551 [0.460]

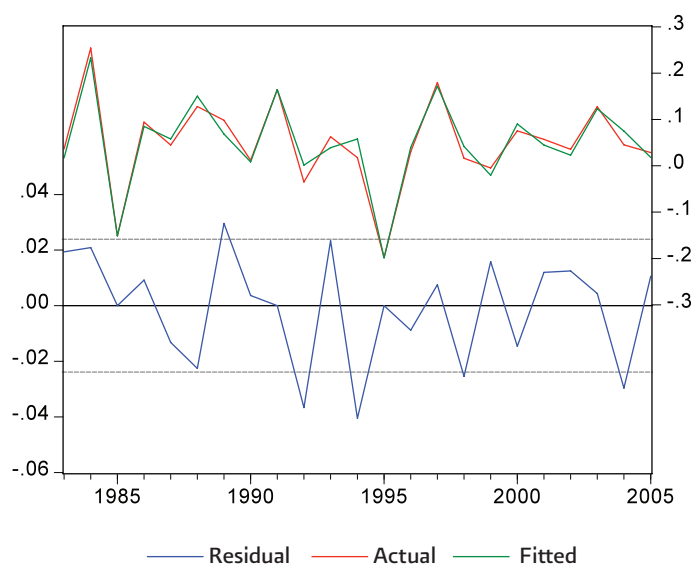
Autocorrelación LM (2 rezagos): F: 1.773 [0.208]

Heterocedasticidad ARCH (2 rezagos): F: 0.080 [0.923]

Error Cuadrático Medio: 0.019

Período: 1983 – 2005

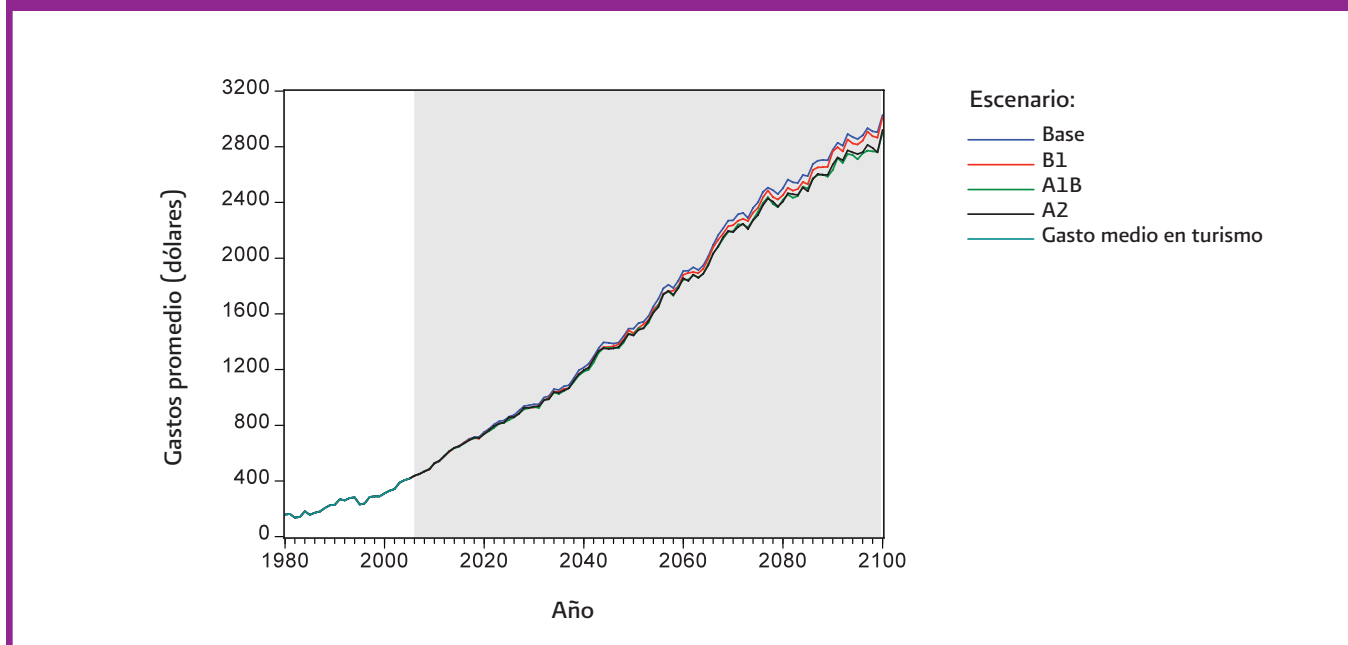
Gráfica 97. Valores actuales, estimados y residuales de la demanda de turismo: 1985-2005



Con la finalidad de analizar el posible comportamiento del gasto en turismo ante shocks en las variables económicas y ambientales se realizó entonces un análisis de impulso–respuesta a la trayectoria del gasto en turismo (Naka y Tufte, 1997). En este caso los resultados indican los efectos de una desviación estándar en las innovaciones de la temperatura que se traducen en un impacto negativo en el gasto en turismo internacional. Ello confirma el impacto negativo de la temperatura en el turismo internacional. Tomando en cuenta las relaciones de largo y corto plazos se realizaron entonces diversos escenarios para poder identificar la conducta del gasto en turismo hasta el 2100. En la construcción de estos escenarios se enfatizó en el impacto que tendría la temperatura sobre el turismo con cuatro tipos de escenarios: primero se realizó un escenario base en donde se hicieron supuestos sobre el comportamiento de la economía de Estados Unidos de Norteamérica mediante un modelo ARIMA, el tipo de cambio real, el índice bursátil y la temperatura se mantuvieron constantes. Los siguientes escenarios están contruidos con el escenario del crecimiento del PIB de Estados Unidos de Norteamérica y además con los escenarios de temperatura planteados por el IPCC (2007), B1, A1B y A2, así como el tipo de cambio y el índice bursátil constantes.

Los resultados indican que en el caso del escenario base existe una relación positiva del turismo con respecto al comportamiento del PIB de Estados Unidos de Norteamérica ya que su tendencia es a incrementarse de 2006 a 2100 en cerca de 319%, lo que representa una tasa de crecimiento anual del 3.3% anual. Sin embargo, en los casos de los escenarios B1, A1B y A2 en las trayectorias se observa que existe una disminución en el gasto por turismo siendo el escenario A2 el más pesimista (Gráfica 98). Estos resultados pueden ser más importantes debido a que con el calentamiento global de la tierra los fenómenos meteorológicos pueden tener un efecto catastrófico sobre los diferentes complejos turísticos haciendo que el gasto pueda caer de un período a otro de manera considerable.

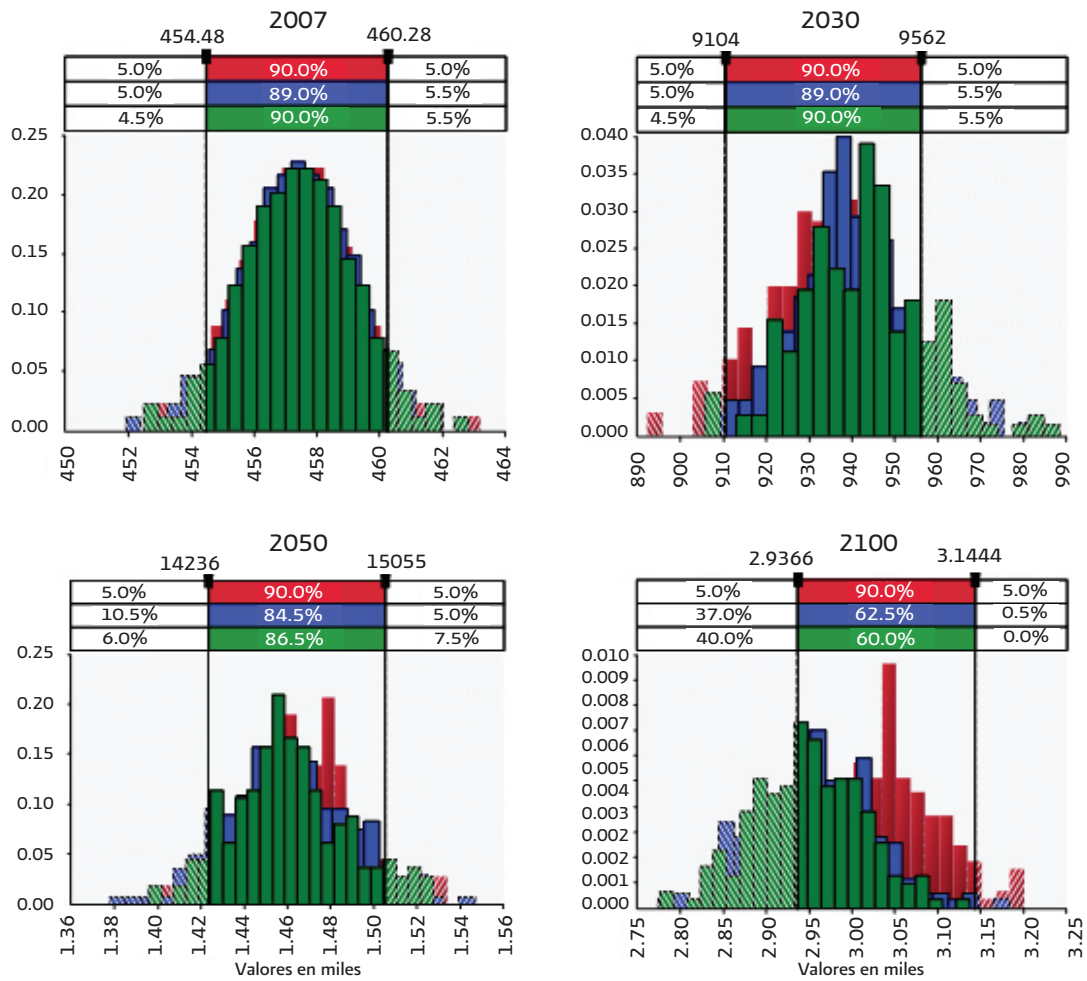
**Gráfica 98. Comportamiento del gasto promedio del turismo internacional bajo diferentes escenarios climáticos: 1980-2100**



Para complementar los resultados anteriores se realizó un análisis de riesgo para los años 2007, 2030, 2050 y 2100 con base a los diferentes escenarios de temperatura. Los resultados de las Simulaciones Monte Carlo se presentan en la Gráfica 99 e indican que para el año 2007 las distribuciones de probabilidad se comportan de manera similar en los tres escenarios presentando casi el mismo porcentaje de ocurrencia y ubicando, con un noventa por ciento de probabilidad, el gasto entre 454 y 460 dólares. Conforme pasa el tiempo la incertidumbre asociada a la temperatura comienza a generar intervalos mayores. Asimismo, se observa que las distribuciones en los años 2030 y 2050 comienzan a tener una ligera separación atendiendo a los escenarios A1B y A2 con un ligero sesgo hacia la derecha a valores menores. En relación al año 2100, se observa que las distribuciones tienden paulatinamente a separarse.

Así, para el 2050, los costos promedio bajo los tres escenarios están alrededor de 0.003% del PIB con tasa de descuento de 4%. Para el 2100 estos costos promedio se incrementan, y representan el 0.025 del PIB descontando al 4% y de 0.18% con tasa de 0.5% (Cuadro 99).

**Gráfica 99. Análisis de riesgo del gasto en turismo internacional en México con cambios en la temperatura**



Nota: las barras de color rojo corresponden al escenario B1, las barras de color azul corresponden al escenario A1B y las Barras de color verde corresponden al escenario A2. las Gráficas fueron elaboradas con simulaciones Montecarlo con 200 intecciones.

## CUADRO 99. COSTOS TOTALES DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL TURISMO INTERNACIONAL EN MÉXICO AL 2050 Y 2100 BAJO DIFERENTES ESCENARIOS (PORCENTAJE DEL PIB)

Modelo	2050			2100		
	Tasa de descuento			Tasa de descuento		
	0.5%	2%	4%	0.5%	2%	4%
B1	0.005%	0.004%	0.002%	0.092%	0.041%	0.017%
A1B	0.008%	0.005%	0.003%	0.194%	0.078%	0.029%
A2	0.006%	0.004%	0.003%	0.180%	0.072%	0.025%

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. El sector turismo es un importante impulsor de la actividad económica tanto a nivel local como nacional. Ello debido a que es una actividad que capta divisas, es una fuente generadora de empleos, además de que favorece la inversión y la producción y el consumo de diversos bienes y servicios y la ampliación de la infraestructura. Asimismo este sector es vulnerable a los desastres naturales que afectan significativamente la demanda de turismo llegando a tener cuantiosas pérdidas humanas, pérdidas económicas en infraestructura y en ingresos turísticos.
2. La evidencia empírica indica que la demanda de turismo depende del ingreso y de los precios relativos representando por el tipo de cambio real; asimismo se observa que el turismo internacional responde a variables climáticas y de riesgo aproximado por el índice de la bolsa de valores. En particular, se observa que un aumento de la temperatura que puede aproximar al crecimiento de los eventos extremos genera una reducción del turismo. La elasticidad estimada es considerable y sugiere que un aumento de la temperatura en uno por ciento reduce el ingreso del turismo internacional. Ello se confirma con el análisis impulso-respuesta que indica que el ingreso, la paridad real y el índice bursátil tienen efectos positivos sobre el gasto en turismo, al contrario del *shock* en temperatura que tendrá un efecto negativo en los siguientes períodos.
3. Las Simulaciones, bajos los diferentes escenarios climáticos hasta el 2100, indican que el gasto en turismo tiene un efecto a disminuir conforme a los escenarios de temperatura, y en consecuencia en referencia a otros fenómenos y desastres naturales intensificados por el cambio climático.
4. Para el 2100 los costos promedios oscilan entre el 0.18% y el 0.025% del PIB descontando a tasas de 0.5% y 4%, respectivamente.

## RECOMENDACIONES

- a. El sector turismo en México tiene un impacto importante sobre la actividad económica tanto a nivel regional como nacional, por lo tanto es necesario llevar a cabo políticas públicas que apoyen las iniciativas de diversificación del desarrollo turístico. Además es importante que estas políticas estén acorde con los ecosistemas buscando minimizar el daño a diversos recursos naturales y al medio ambiente en general. Estas políticas no deben de estar separadas de las planteadas para combatir el cambio climático, es decir, deben de tener una complementariedad entre ellas a fin de poder cumplir con el desarrollo sustentable.
- b. Es necesario diversificar la oferta turística hacia otras áreas que no estén sujetas a eventos extremos. Por ejemplo, fomentar el turismo a actividades distintas a aquellas relacionadas con playa. Además debe realizarse una importante inversión pública y privada de calidad en infraestructura y capacitación humana que permita, en caso de desastres naturales, que las pérdidas tanto humanas como económicas sean menores.
- c. El sector turismo puede generar una reducción sustancial de sus emisiones de carbono como resultado de la aplicación de las nuevas tecnologías. Por ejemplo, alojamientos y restaurantes que pueden utilizar energías renovables (solar y eólica); transporte terrestre que puede utilizar la energía más limpia y motores híbridos; la aviación puede beneficiarse de las tecnologías que acortan las rutas aéreas y mejorar los procedimientos de descenso, el consumo de combustible y la conservación y “vuelos neutrales de emisiones”. Asimismo, es importante reducir los desechos del sector. En todo caso se observa que existe un importante nicho de mercado sobre un turismo verde.
- d. Hacer campañas más estrictas de concientización por parte de los turistas y residentes del complejo turísticos para conservar los recursos naturales y no modificar los ecosistemas que afecten al medio ambiente, a los visitantes y a habitantes del lugar.

## 3.7. SALUD

### Puntos fundamentales

El cambio climático tiene efectos en la salud de la población. Estos impactos, se pueden cuantificar en términos de morbilidad y mortalidad por causas asociadas a cambios en el clima. A pesar de la dificultad para determinar con precisión los efectos en la salud atribuibles al cambio climático, el consenso a nivel internacional señala a éste como el responsable de que se hayan presentado 150,000 muertes en los últimos 40 años, relacionadas con el aumento de enfermedades como la diarrea, la malaria y la malnutrición, como resultado de las inundaciones y el aumento de la temperatura (WHO, 2006). La malaria, de manera particular, por ser una enfermedad propia de regiones tropicales se ve alterada ante el cambio climático. El aumento en la temperatura hace que mayores zonas en el mundo cuenten con un clima propicio para los vectores transmisores de la enfermedad. Los resultados presentados en el cuarto reporte de evaluación sobre cambio climático señalan que para el 2100 se presentarán en África incrementos entre 16 y 28% de las personas-mes expuestas, a través de todos los escenarios de cambio climático (IPCC, 2007), sin embargo esta evidencia no es concluyente para América Latina.

El cambio climático también se ha manifestado a través de un aumento de las olas de calor, generando impactos sobre la mortalidad de la población más vulnerable como los adultos mayores. Estudios realizados en Europa muestran aumentos superiores al 20% en la mortalidad diaria durante las temporadas de olas de calor (Michelozzi *et al.* 2004 y Vandentorren *et al.* 2004).

La evidencia internacional indica que las concentraciones de ozono en las áreas urbanas tienen efectos sobre la mortalidad cardíaca prematura, neumonía, asma, enfermedades pulmonares y respiratorias que se incrementan con aumentos en la temperatura (Bufalini *et al.*, 1989). El efecto combinado, obtenido a partir de estudios realizados en diferentes países del mundo, muestran que la población infantil y la adulta mayor son las más afectadas con las concentraciones del ozono; un crecimiento de las concentraciones en 10 ppb representa un aumento de entre 1.20% y 0.74% en la mortalidad infantil y la mortalidad por causas respiratorias, y de 2.71% en las admisiones a hospitales por causas cardiovasculares y respiratorias.

Los estudios realizados a nivel internacional han permitido identificar la asociación de las concentraciones de PM<sub>10</sub> con la mortalidad y la morbilidad por causas respiratorias y cardiovasculares, siendo igualmente los adultos mayores y la población infantil los que reciben los mayores impactos. El meta-análisis realizado permite relacionar un aumento de 10 µg/m<sup>3</sup> con un aumento de 2.65% en la mortalidad infantil y de 1.48% en los adultos mayores de 65 años. En términos de morbilidad, la población asmática y los síntomas en vías respiratorias también se ven afectados con el aumento en las concentraciones de PM<sub>10</sub>.

Las estimaciones realizadas a partir de las Simulaciones de Monte Carlo sobre los efectos que tendría en la salud una reducción de 10 ppb en los niveles de exposición a ozono y de 10 µg/m<sup>3</sup> de PM<sub>10</sub> dejan ver los beneficios significativos de instrumentar políticas públicas en ese sentido. Los resultados muestran que en las zonas metropolitanas del Valle de México, Guadalajara y Monterrey se evitarían para el año 2100 en promedio 2.285 muertes asociadas con el ozono y 4.990 muertes asociadas con el PM<sub>10</sub>. Los casos de muertes evitadas por causas respiratorias, cardiovasculares y de enfermos por bronquitis también son significativos.

La valoración económica preliminar de estos impactos para el periodo 2009–2100 del valor presente neto de los beneficios por los casos evitados de mortalidad y morbilidad, respectivamente, por las menores emisiones de PM<sub>10</sub> son de 669.676 millones de pesos a precios de 2003, mientras que los beneficios en salud que arrojan las menores emisiones de ozono son de 529.002 millones de pesos, para todo el horizonte de tiempo analizado.

## 1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático tiene también consecuencias significativas en la salud de la población tanto a través de cambios en la temperatura y la precipitación como a través de los eventos extremos. No obstante, estos efectos se presentan normalmente por medio de canales indirectos tales como la calidad del aire y agua, calidad y cantidad de la comida, agricultura, ecosistemas y la infraestructura. En este sentido, algunos de estos impactos ya están contabilizados en los otros sectores; no obstante es posible identificar algunos efectos específicos que se asocian directamente

con la mortalidad y la morbilidad de la población. Asimismo, debe considerarse que los impactos son heterogéneos dependiendo de los actuales niveles de temperatura y los límites correspondientes. Estos impactos son aun preliminares debido a que los rangos de incertidumbre son aun elevados y las relaciones de causalidad directa no son necesariamente muy robustas. Desde luego, los efectos del clima son también asimétricos ya que, en regiones frías, un aumento de la temperatura puede reducir las muertes por hipotermia, aunque en general se estima que el impacto del cambio climático es negativo en la salud (McMichael, 1996). En este sentido el principal objetivo de este capítulo es identificar y establecer los efectos potenciales del cambio climático en la salud de la población excluyendo aquellos ya contabilizados en otros apartados. Estos resultados son sin embargo preliminares atendiendo a la debilidad de la evidencia empírica.

## 2. MARCO GENERAL Y EVIDENCIA DISPONIBLE

El cambio climático tiene efectos en la salud de la población. Estos impactos, se pueden cuantificar en términos de morbilidad y mortalidad por causas asociadas a cambios en el clima. A pesar de la dificultad para determinar con precisión los efectos en la salud atribuibles al cambio climático, el consenso a nivel internacional señala a éste como el responsable de que se hayan presentado 150,000 muertes en los últimos 40 años, relacionadas con el aumento de enfermedades como la diarrea, la malaria y la malnutrición, y como resultado de las inundaciones y el aumento de la temperatura (WHO, 2006). La malaria, de manera particular, por ser una enfermedad propia de regiones tropicales se ve alterada ante el cambio climático. El aumento en la temperatura hace que mayores zonas en el mundo cuenten con un clima propicio para los vectores transmisores de la enfermedad. Los resultados presentados en el cuarto reporte de evaluación sobre cambio climático señalan que para el 2100 se presentarán en África incrementos entre 16% y 28% de las personas-mes expuestas, a través de todos los escenarios de cambio climático (IPCC, 2007), sin embargo esta evidencia no es concluyente para América Latina. Además, la información disponible indica que altos niveles de ozono o de las partículas suspendidas genera problemas de salud tales como asma, enfermedades pulmonares, bronquitis crónica, sinusitis recurrentes y falta de aire (Henderson, 2002).

### Evidencia sobre impactos climáticos en la morbilidad y la mortalidad

La Organización Mundial de la Salud (2006) y Stern (2006) estiman que los principales impactos en la salud de la población del cambio climático a nivel internacional son:

Enfermedad/infección	Muertes anuales	Carga de morbilidad atribuible al cambio climático (muertes/% del total)
Infecciones diarreicas	2.0 millones	47.000 / 2%
Malaria	1.1 millones	27.000 / 2%
Malnutrición	3.7 millones	77.000 / 2%
Enfermedad cardiovascular	17.5 millones	Datos totales de calor/frío no suministrados
VIH/SIDA	2.8 millones	Sin elemento atribuible al cambio climático
Cancer	7.6 millones	Sin elemento atribuible al cambio climático

Fuente: OMS, 2006 en Stern 2006

Así, los principales impactos se pueden enumerar en los siguientes puntos:

1. Aumentos en la temperatura ocasionan un cambio en la distribución e intensidad de algunas enfermedades infecciosas. Por ejemplo, el aumento de las enfermedades transmitidas vectorialmente como el dengue y la malaria en zonas insalubres (Pérez, A. 2008 y Hayden, M. 2008). Estos impactos de enfermedades transmitidas y la diarrea aumentan como consecuencia de las inundaciones (Sur *et al.*, 2000, Gabastou *et al.*, 2000, Katsumata *et al.*, 1998, Volalrd *et al.*, 2004). Asimismo, el mosquito de la malaria puede aumentar hasta en 80% las enfermedades e infecciones en los próximos 80 años para Malasia (Asian Development Bank) aunque en otras regiones este aumento será menor (alrededor de 7 y 28%). No obstante, las simulaciones realizadas muestran que en los casos de malaria se pueden doblar en zonas tropicales (Oneill, 2001,) aunque la evidencia no es concluyente para América Latina (Benítez *et al.*, 2004 en IPCC). Asimismo, la evidencia muestra que el dengue se asocia a cambios en los patrones climáticos (Hales *et al.*, 2002, 1999, Corwin *et al.*, 2001, Gagnon *et al.*, 2001), por ejemplo, en México se ha observado que en lugares como Yucatán donde no se había presentado el dengue empieza a aparecer. En todo caso, las enfermedades de parásitos tenderían a aumentar en un mundo más cálido (Oneill, 2001).
2. El aumento de la temperatura ocasiona además posibles envenenamientos por comida. Por ejemplo, se incrementan los casos de salmonelosis con el alza de la temperatura (D'Souza *et al.*, 2004, Kovats *et al.*, 2005, Louis *et al.*, 2005 y Tam *et al.*, 2006).
3. El aumento de olas de calor o estrés calórico que consiste en que durante cinco días seguidos se presenten temperaturas por arriba de la temperatura del cuerpo (37 °C) se traduce en mareos, fatiga y debilidad y que de alcanzar 41 °C de temperatura puede generar dolores de cabeza con desmayos y luego la muerte (Oneill, 2001). Así, el aumento de las olas de calor incrementará la mortalidad en particular en la población más sensible como niños y población adulta mayor (Basu y Samet, 2002, Koppe *et al.*, 2004, Qiu *et al.*, 2002, Ando *et al.*, 2004, Choi *et al.*, 2005 y Kabuto, *et al.*, 2005). Por ejemplo, se estima que las altas temperaturas contribuyen con alrededor del 0.5 y 2.0% de muertes anuales en la población adulta en Europa. Asimismo, se estima (Kalkeinstein, 1993b en Oneill, 2007) que con un aumento de temperatura de 2 ó 3 °C se incrementa la mortalidad en 7 veces, de modo que se considera que con el doble de emisiones de CO<sub>2</sub> los muertes aumentarían 5 veces (Kalkeinstein y Smoyer, 1993). Por el otro lado, el aumento de la temperatura media reduce las muertes por frío (Kalkeinstein 1989 y 1993 y Langford y Berntham, 1993). En el caso mexicano en el extremo se observan en algunos Estados del norte del país temperaturas superiores a los 40°C en verano que inciden en la salud de la población.
4. Existe evidencia de que la mortalidad cardiaca prematura, neumonía, asma, enfermedades pulmonares y respiratorias aumenta debido a las concentraciones de ozono en las áreas urbanas (Scott y Diab, 2000 y Yarnal *et al.*, 2001 en IPCC, Mudway y Kelly, 2000 y Bell *et al.*, 2005 y Levy *et al.*, 2005). La evidencia sugiere que estos impactos se intensificarían con un aumento de la temperatura. Por ejemplo, Bufalini *et al.*, (1989) estiman que un incremento de 4 °C de temperatura intensifica, en tres veces, el impacto de las concentraciones de ozono.



## Impactos proyectados del cambio climático sobre la malaria y otras enfermedades infecciosas

Área	Efecto en la salud	Incremento en la temperatura	Principales resultados
África	Mayor riesgo para la transmisión estable de la malaria	1.1 a 1.3 °C en 2020; 1.9 a 3.0 °C en 2050; 2.6 a 5.3 °C en 2080	Para el 2100, incremento de 16 a 28% en las personas-mes expuestas a través de todos los escenarios de cambio climático
Gran Bretaña	Probabilidad de transmisión de la malaria	1 a 2 °C	Incremento de 8 a 15% en el riesgo de transmisión local de la malaria
Portugal	Porcentaje de días por año con temperatura favorable para la transmisión de la malaria	3.3 °C en 2040 y 5.8 °C en 2090, comparado 1981 con 1990 y 2.006 con 2036	Incremento significativo en el número de días capaces de sobrevivir el vector que transmite la malaria
Australia	Regiones con climas aptos para la transmisión del dengue	1.8 a 2.8 °C comparando 1961 con 1990	Bajo escenarios de altas emisiones, regiones como el sur de Sidney podrían llegar a tener un clima apto para la transmisión de la enfermedad
Inglaterra y Gales	Intoxicaciones con alimentos	0.57 a 1.38 °C en 2020; 0.89 a 2.44 °C en 2050; 1.13 a 2.47 °C en 2080, comparando 1961 – 1990	Para incrementos en la temperatura de +1, +2 y +3 °C, incrementos absolutos de aproximadamente 4000, 9000 y 14000 casos notificados de intoxicación con alimentos
Los Ángeles – EU	Días al año con olas de calor, duración de las temporadas de olas de calor y mortalidad relacionada con las olas de calor	1.35 a 2.30 °C en 2030; 2.30 a 5.80 °C en 2080, comparando 1961 – 1990	Para 2080, en Los Ángeles, se incrementa 4 veces el número de días con olas de calor bajo el escenario B1 y de 6 a 8 veces bajo el A1FI. El número de muertes al año relacionadas con el calor se incrementa de 165 en 1990 a entre 319 y 1.182 bajo diferentes escenarios

Fuente: IPCC (2007)

El conjunto de esta evidencia puede sintetizarse en un meta-análisis para el caso de México atendiendo a la exposición de ozono, a PM<sub>10</sub> y olas de calor. Desde luego, este análisis es aun preliminar ya que las causalidades no están claramente establecidas en la literatura. Los estudios seleccionados se basan en artículos publicados en las bases de datos de Medline<sup>54</sup>, Proquest Medical Library<sup>55</sup> y Jstor<sup>56</sup>. Los criterios utilizados para seleccionar los estudios incorporados al meta-análisis fueron incluir aquellos trabajos que evalúan la asociación entre exposición a O<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub> y olas de calor en salud, que controlen estadísticamente por el efecto de otros contaminantes, y por variables climáticas, que incluyan intervalos de confianza en el análisis y área geográfica, que no representen trabajos con animales de laboratorio y que no se dediquen a establecer efectos bioquímicos o moleculares.

<sup>54</sup> <http://ovidsp.uk.ovid.com/spa/ovidweb.cgi>

<sup>55</sup> <http://proquest.umi.com/pqdweb?RQT=302&cfc=1>

<sup>56</sup> <http://www.jstor.org/?cookieSet=1>

El parámetro de medida utilizado para determinar el impacto sobre los riesgos en salud es el de riesgo relativo (RR). La variación utilizada en todos los casos fue 10 ppb en ozono y 10 µg/m<sup>3</sup> para PM<sub>10</sub>. Con el fin de hacer comparable los efectos obtenidos de cada estudio y obtener estimaciones semejantes, se transformaron las diferentes formas de cuantificar las partículas suspendidas en su equivalente a PM10, usando los siguientes factores de corrección:  $PM_{10} \approx TSP * 0.55$ ,  $PM_{10} \approx PM_{2.5} / 0.6$ ,  $PM_{10} \approx BS^{57}$  (Lacasaña *et al.*, 2005 y Rosales-Castillo *et al.*, 2001). Para obtener el efecto combinado de todos los impactos en salud se utiliza un modelo de efectos aleatorios bajo el supuesto de que los análisis incluidos representan una muestra aleatoria (Molinero *et al.*, 2003). Este efecto combinado se obtiene en una media ponderada de los estimadores individuales donde los pesos respectivos se calculan como el inverso de la suma de la varianza de cada estudio más la varianza entre estudios (Schwartz, 1994 y Pértega *et al.*, 2006).

Los principales resultados obtenidos de la meta-análisis para identificar los impactos de las concentraciones de ozono y material particulado menor a diez micras se sintetizan en los Cuadros 100 y 101. En estos cuadros se observa que los principales efectos en salud se concentran en la población infantil y en los adultos mayores en mortalidad prematura, morbilidad respiratoria, admisiones hospitalarias, vistas a salas de urgencias y días de actividad restringidos. Así, la mortalidad potencial asociada a ozono se concentran en adultos mayores (1.2%) lo que es consistente con la literatura internacional (Cakmak *et al.*, 2007, Goldberg *et al.*, 2001 y Borja *et al.*, 1997).

Como consecuencia de la controversia sobre el impacto de la exposición a ozono en la mortalidad se presentan separados los estudios que controlan por otros contaminantes como PM<sub>10</sub>, dióxido de azufre y aquellos estudios que sólo controlan por variables meteorológicas. De este modo, se puede observar que el efecto atribuido al ozono en la mortalidad por todas las causas es relativamente similar (Gráfica 100). Esto es, un aumento de los niveles de ozono de 10 ppb ocasiona un incremento de 0.40% en la mortalidad controlando por temperatura y variables estacionales y un aumento de 0.46% al controlar además por otros contaminantes. En la mortalidad infantil se observa que un aumento de las concentraciones de ozono de 10 ppb se asocia con un incremento de la mortalidad infantil de 1.20%. Estos valores son menores a aquellos obtenidos por Lommis *et al.*, 1999.

Los impactos de un aumento de 10 ppb en las concentraciones de ozono en la morbilidad, que se asocia a un agravamiento de las condiciones de salud, sugieren que los ataques de asma y del uso de broncodilatador aumentan en 10.4%. Este resultado es similar a Rosales (2001) en México, sin embargo, Ross (2002) encuentran un impacto mayor en Estados Unidos de Norteamérica (28.5%). Este incremento de las concentraciones de ozono ocasiona también un aumento de 2.71% de las hospitalizaciones y de 1.13% sobre las visitas de urgencias. Estas elasticidades son relativamente similares a Téllez *et al.*, 1997 y Hernández *et al.*, 2000 que estiman aumentos de 1.48 y 1.98% en el número diario de consultas de urgencias en Ciudad Juárez y la Ciudad de México respectivamente.

## CUADRO 100. ESTIMACIÓN COMBINADA PARA EFECTOS EN LA SALUD ASOCIADOS CON LA EXPOSICIÓN A OZONO

Efecto en la salud	% de cambio <sup>1</sup>	IC 95%	Notas
1. Mortalidad			
Por todas las causas (No ajustada)	0.40	0.17 – 0.63	Ajustado por temperatura y variables estacionales
Por todas las causas (ajustadas)	0.46	0.09 – 0.83	Ajustado por PM <sub>10</sub> y/u otro(s) contaminantes
Cardiovascular	0.64	0.27 – 1.02	
Respiratoria	0.74	0.13 – 1.35	
Personas > 65	0.50	0.34 – 0.66	
Infantil	1.20	-1.66 – 4.05	

<sup>57</sup> TSP hace referencia a las partículas suspendidas totales, BS al humo negro y PM<sub>2.5</sub> a las partículas menores a 2.5 micras.

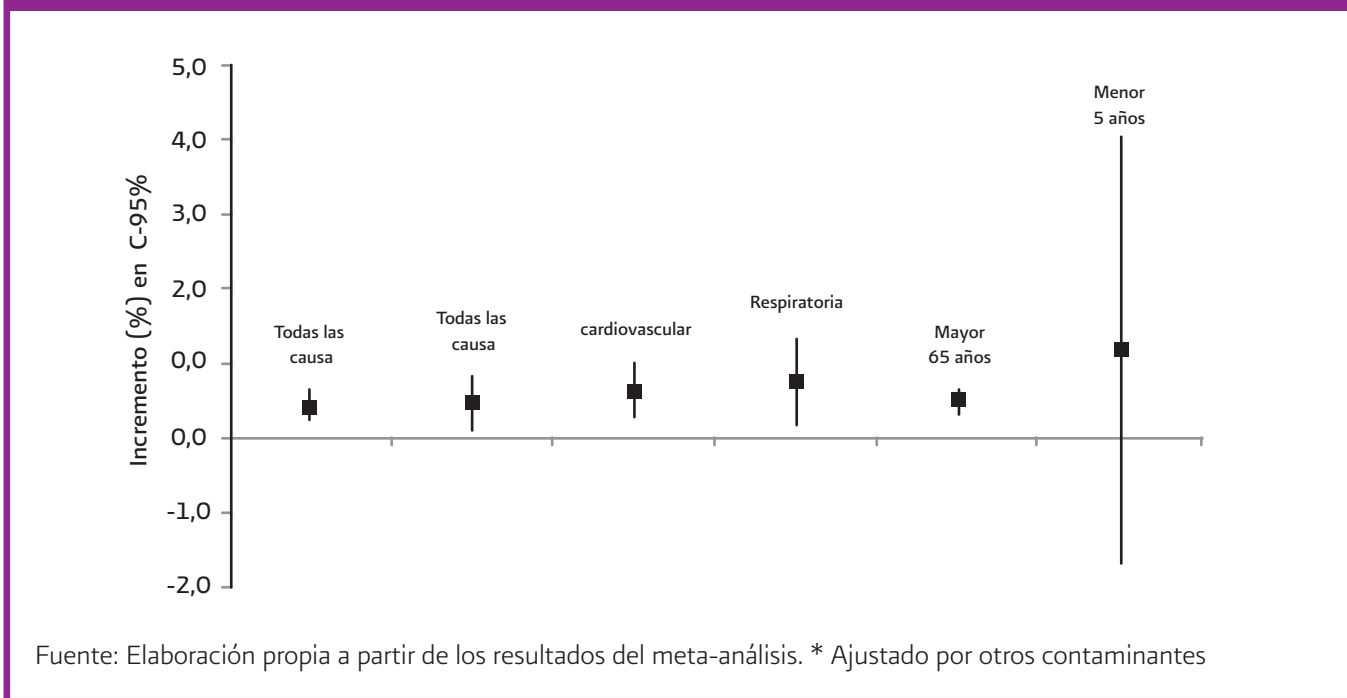
## CUADRO 100. ESTIMACIÓN COMBINADA PARA EFECTOS EN LA SALUD ASOCIADOS CON LA EXPOSICIÓN A OZONO (CONTINUACIÓN)

Efecto en la salud	% de cambio <sup>1</sup>	IC 95%	Notas
2. Morbilidad			
Admisión en hospitales	2.71	1.20 – 4.21	Por causas cardiovasculares y respiratorias
Visita a salas de urgencias	1.13	-2.60 – 4.85	Por enfermedad respiratoria, asma y cardiovascular
Efectos en asmáticos	10.40	5.19 – 15.60	Incluye ataque de asma, tos sin flema y con flema, uso de broncodilatador, síntomas respiratorios menores
Síntomas en vías respiratorias	0.98	-4.72 – 6.67	Incluye síntomas en vías respiratorias inferiores y superiores, sibilancias y bronquitis aguda.
Días de actividad restringida menor	2.22	1.13 – 3.32	

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados del meta-análisis.

<sup>1</sup>/ El porcentaje de cambio hace referencia a un aumento de 10 ppb.

Gráfica 100. Cambio porcentual en la mortalidad por aumento de 10 ppb de Ozono



Los impactos de las partículas de  $PM_{10}$  concentran sus efectos más intensos en la población adulta mayor e infantil. Las estimaciones de la meta-análisis se sintetizan en el Cuadro 101 y Gráfica 101. Así, un aumento de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de  $PM_{10}$  se traduce en un incremento de 2.79% en la mortalidad infantil y de 1.21% en la mortalidad de adultos mayores a 65 años. Lacasaña *et al.*, (2005) encuentra un valor de 3.3% en mortalidad infantil. La morbilidad ocasionada por un aumento de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de  $PM_{10}$  se traduce en un incremento de los efectos en asmáticos de 2.33%. Zhang *et al.*, (2002) encuentran un impacto de 1.42% en los padecimientos en China.

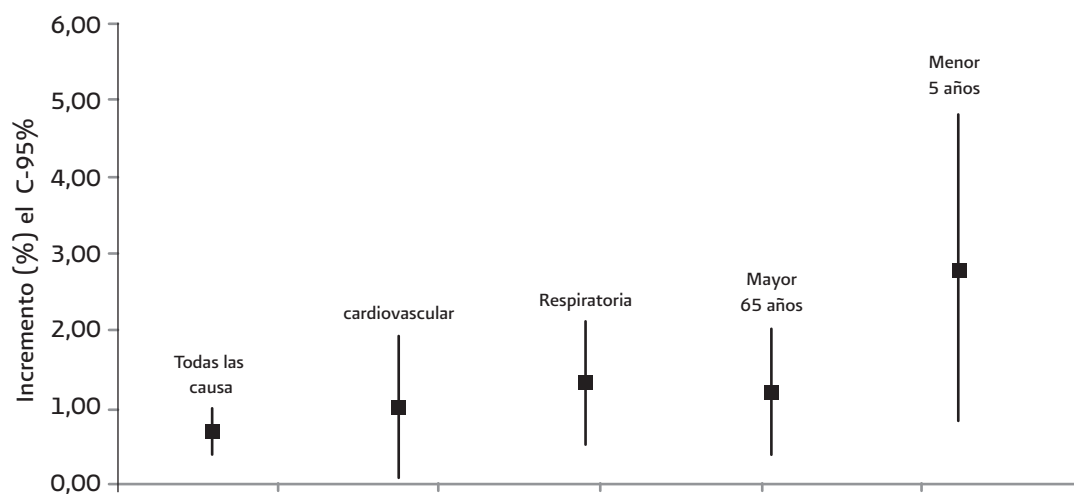
## CUADRO 101. ESTIMACIÓN COMBINADA PARA EFECTOS EN LA SALUD ASOCIADOS CON LA EXPOSICIÓN A PM<sub>10</sub>

Efecto en la salud	% de cambio	IC 95%	Notas
<b>1. Mortalidad</b>			
Por todas las causas	0.68	0.39 – 0.98	Ajustado por O <sub>3</sub> y/u otro(s) contaminantes
Cardiovascular	1.00	0.09 – 1.91	
Respiratoria	1.33	0.54 – 2.11	
Personas > 65 años	1.21	0.39 – 2.03	
Infantil	2.79	0.77 – 4.82	
<b>2. Morbilidad</b>			
Admisión en hospitales	1.28	-0.04 – 2.60	Por causas cardiovasculares y respiratorias
Vísita a la sala de urgencias	1.44	-0.10 – 2.97	Por enfermedad respiratoria, asma y cardiovascular
Efectos en asmáticos	2.33	-5.09 – 9.75	Incluye ataque de asma, tos con flema y sin flema, uso de broncodilatador, síntomas respiratorios menores
Síntomas en vías respiratorias	1.59	-5.47 – 8.65	Incluye síntomas en vías respiratorias inferiores y superiores, sibilancias y bronquitis aguda.
Días de actividad restringida menor	0.43	0.04 – 0.82	

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados del meta-análisis.

<sup>1/</sup> El porcentaje de cambio hace referencia a un aumento de 10 µg/m<sup>3</sup>.

Gráfica 101. Cambio porcentual en la mortalidad por aumento de 10 µg/m<sup>3</sup> de PM<sub>10</sub>

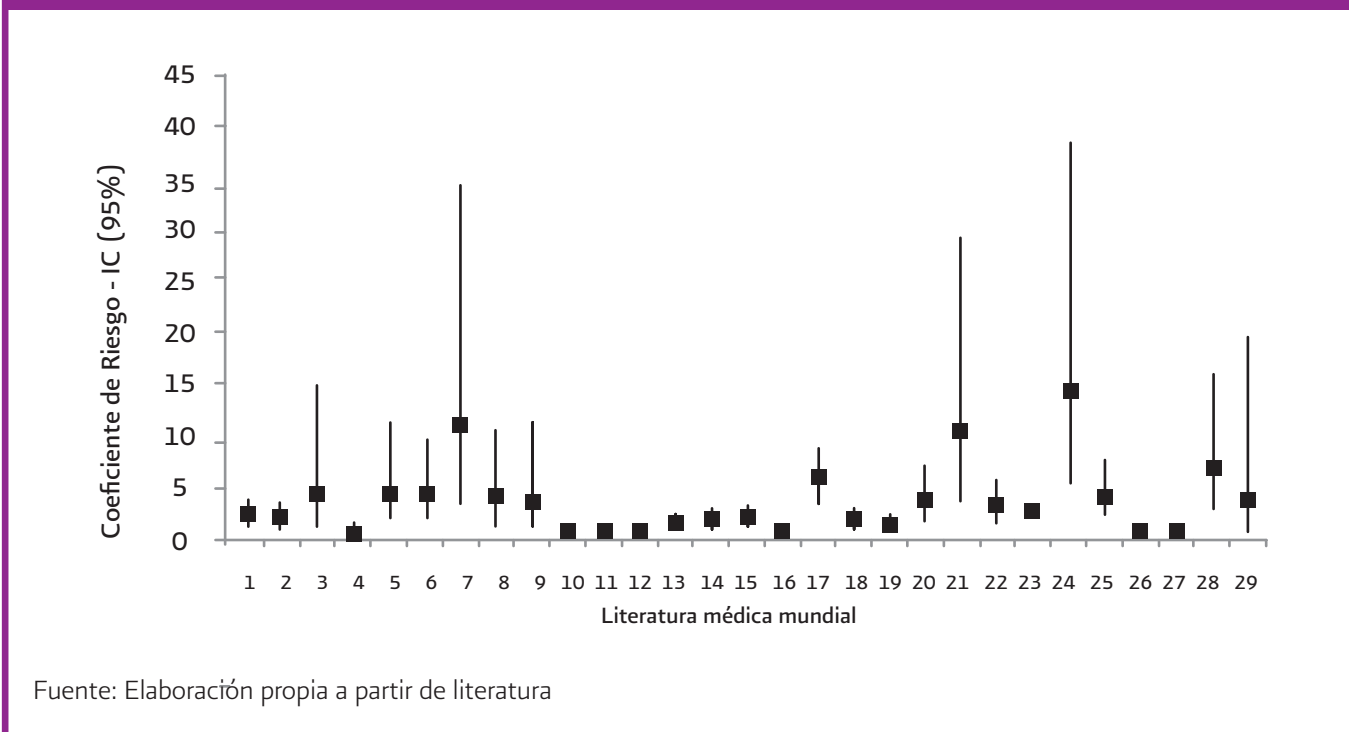


Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados del meta-análisis.

En el caso de la malaria, que es considerada una enfermedad tropical, se espera que se desarrolle y difunda más con el aumento de la temperatura global y los cambios en precipitación (Martens *et al.*, 1995). En efecto, los vectores *Plasmodium falciparum* y *Plasmodium vivax*, transmisores de la malaria, se desarrollan a temperatura de entre los 15 y 18 grados (Patz *et al.*, 2006).

La evidencia disponible (Campbell *et al.*, 2006) sugiere que la probabilidad de contraer malaria aumenta en correspondencia con la presencia de algunos factores de riesgo. Así, en primer lugar, se observa que el riesgo de contraer malaria asociado a diversos factores ambientales por vivir en zonas endémicas relacionados a una distancia específica de ríos, estanques, arroyos o corrientes de agua es de 0.5 y 10.9% (Matthys *et al.*, 2004, Hustache *et al.*, 2007, Rodríguez *et al.*, 2007). En segundo lugar, se observa el riesgo de contraer esta enfermedad en viviendas construidas con material precario (barro, cartón madera), es de 1.7 y 2.5% mayor al promedio. En tercer lugar, el riesgo ocasionado por condiciones de hacinamiento aumentan en 1.5% en viviendas habitadas por siete personas y en 2.0% en viviendas con más de 11 personas<sup>58</sup> (Hustache, 2007 y Rodríguez, 2007). En cuarto lugar, se observa que la distancia a lugares de cría o vivienda de ganado incrementa el riesgo en zonas endémicas entre 1.26 y 10.46% (Hoek *et al.*, 2003 y Dev *et al.*, 2004). Por su parte, la mortalidad por malaria indica que los riesgos por viajes a zonas endémicas están entre 2.9 y 4.3% (Greenberg *et al.*, 2001, Sabatinelli *et al.*, 1994, Bair *et al.*, 1998, Callieri *et al.*, 1998 y Schwartz *et al.*, 2001) (Cuadro 102 y Gráfica 102).

**Gráfica 102. Aumento del riesgo de mortalidad por materia asociados a características ambientales y sociodemográficas**



<sup>58</sup> Para Perú el riesgo sube a 3.5% Rodríguez (2007).

## CUADRO 102 ESTIMACIÓN COMBINADA PARA EFECTOS EN SALUD ASOCIADOS CON OLAS DE CALOR Y MALARIA

Mortalidad Ondas de Calor		
Modelo	Efecto global	Intervalo de confianza
Efecto fijo	1.57	1.13 - 2.01
Efecto aleatorio	6.85	0.70 - 13.01
Morbilidad Malaria		
Modelo	Efecto global	Intervalo de confianza
Efecto fijo	1.33	0.88 - 1.79
Efecto aleatorio	2.61	1.15 - 4.07
Mortalidad Malaria		
Modelo	Efecto global	Intervalo de confianza
Efecto fijo	1.59	0.65 - 2.54
Efecto aleatorio	2.44	0.62 - 4.25

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados del meta-análisis

La evidencia disponible sobre olas de calor muestra que la mortalidad diaria en segmentos poblacionales mayores a 65 años y en estratos de entre 75 a 84, arriba de 84 y arriba de 80 años se incrementa en 14.5, 29.3 45.7 y 2.5 % respectivamente (Michelozzi *et al.*, 2004, Whitman *et al.*, 1997, Holstein *et al.*, 2005, Káiser *et al.*, 2003 y Borell *et al.*, 2006). Así, con base en la estimación de efectos aleatorios del aumento en riesgo de mortalidad por olas de calor, realizada a partir de la literatura internacional, las proyecciones de CONAPO de la población mayor de 65 años para el periodo 2005-2030 y, a partir de éstas proyectando la población al 2100, se estimó una línea base de la trayectoria esperada de la población adicional en riesgo de morir por esta causa y su tasa de crecimiento, para tres zonas metropolitanas de México (Cuadro 103).

## CUADRO 103. RIESGO DE MUERTES A CAUSA DE LAS OLAS DE CALOR EN TRES ZONAS METROPOLITANAS DE MÉXICO

Zona Metropolitana	Población adicional en riesgo			Crecimiento acumulado 2010 - 2100 (%)
	2010	2050	2100	
ZMVM	8.966	21.507	32.326	1.42
ZMG	2.880	6.611	9.711	1.35
ZMM	1.946	4.692	7.040	1.42
Total ZM	13.794	32.790	49.026	1.40

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados del meta-análisis y proyecciones de población

### 3. EVIDENCIA DE LOS IMPACTOS EN MÉXICO

La evidencia empírica para el caso mexicano sobre los impactos de las concentraciones en la atmósfera confirma la presencia de impactos negativos. Así, por ejemplo, las estimaciones realizadas por Evans, Levy, Hammit, Santos-Burgoa y Castillejos, (2002) para la Zona Metropolitana del Valle de México, utilizando una razón de 0.6 entre  $PM_{2.5}/PM_{10}$ , muestran la presencia de una relación importante entre  $PM_{10}$  y diversas enfermedades donde encuentran un coeficiente de 0.6 entre un incremento de muertes diarias y un aumento de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en las concentraciones de  $PM_{10}$ . Por su parte, para la bronquitis crónica, Santos-Burgoa *et al*, (1998) argumentan, con evidencia débil, que un aumento de  $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en las concentraciones de  $PM_{10}$  se traduce en un 20% mientras que los estudios para Estados Unidos de Norteamérica, con información más sólida, indican que un aumento de  $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en las concentraciones de  $PM_{10}$  lleva a un incremento de 10% de las bronquitis crónicas (Evans, Levy, Hammit, Santos-Burgoa y Castillejos, 2002). Sin embargo, las estimaciones del impacto del ozono en la salud presentan aún evidencia débil (Evans, Levy, Hammit, Santos-Burgoa y Castillejos, 2002). Con base en toda la información disponible Evans *et al*, (2002) estimaron los efectos preliminares de la contaminación del aire en la salud (Cuadro 104) al considerar una reducción de 10% en los niveles de exposición tanto de ozono como de  $PM_{10}$ .

#### CUADRO 104. ESTIMACIONES DEL IMPACTO DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE EN LA SALUD A UNA REDUCCIÓN DE 10% DE LOS NIVELES DE EXPOSICIÓN A LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE

Efectos de $PM_{10}$ en salud			
	Casos por persona por año	Coefficiente de riesgo (% por $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Reducción de riesgo (casos por año)
Mortalidad por cohortes	10/1000	3	2000
Mortalidad de series de tiempo	5/1000	1	1000
Bronquitis crónica	14/1000	10	10,000
Efectos del ozono en salud			
Mortalidad por cohortes	5/1000	0.5	300

Notas: Mortalidad por cohortes se estima incluyendo población de 20 años o más y mortalidad de series de tiempo incluye a toda la población. Coeficiente de riesgo son los casos en el tiempo de vida por unidad de exposición y Reducción de riesgo es el porcentaje de riesgo por unidad de exposición. Se utiliza una población de 20 millones con 9 millones por arriba de 30 años de edad.

Las elasticidades de respuesta del número de enfermos crónicos a reducciones en los contaminantes  $PM_{10}$  y ozono para México se presentan en el Cuadro 105. Este coeficiente multiplicado por la población permite obtener el número de casos en que se reduce el riesgo por enfermedades relacionadas con las emisiones. Debe sin embargo considerarse que existen aun grados importantes de incertidumbre sobre estos resultados y que en todo caso de las estimaciones más sólidas son las referidas a  $PM_{10}$  (Banco Mundial, s.f. y Evans, Levy, Hammit, Santos-Burgoa y Castillejos, 2002).

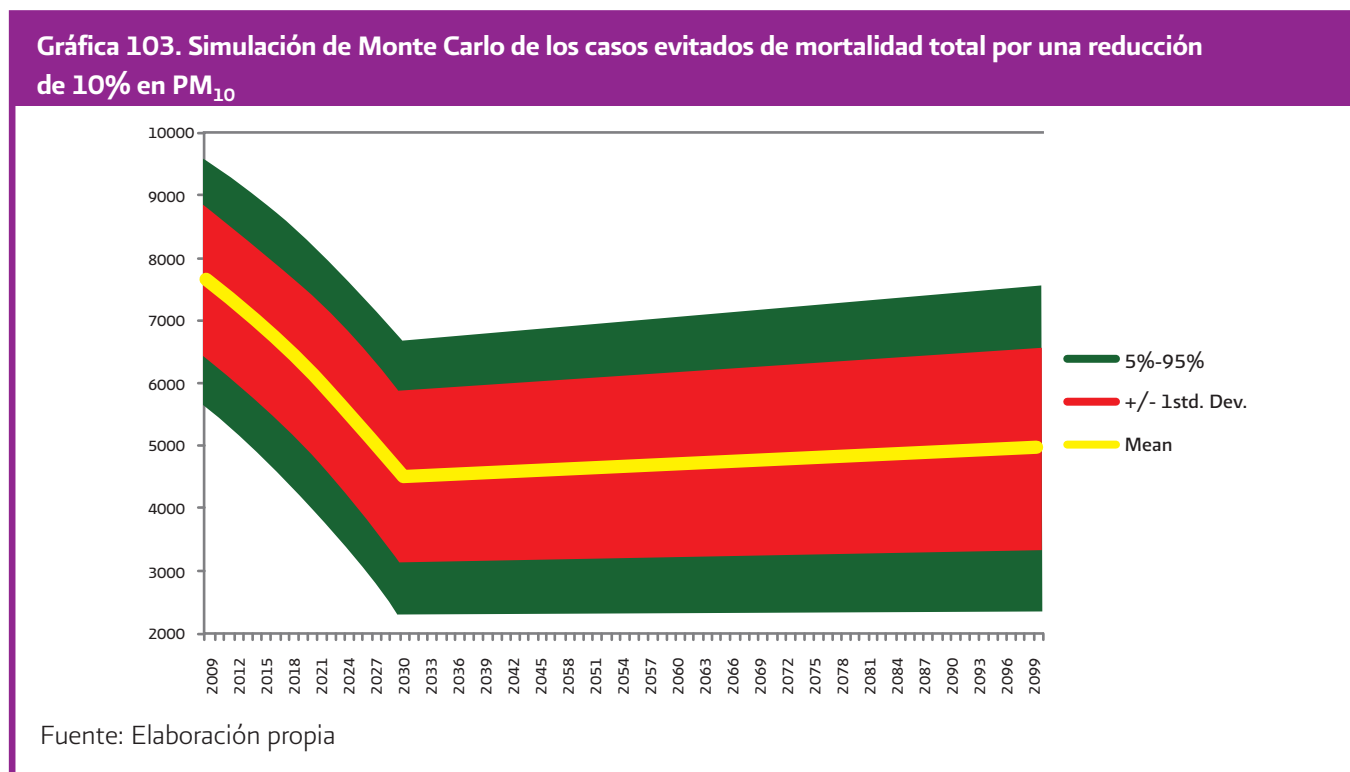
## CUADRO 105. ESTIMACIONES DE LA ELASTICIDAD DE RESPUESTA EN EL NÚMERO DE ENFERMEDADES ANTE UNA REDUCCIÓN DE 10% DE LOS NIVELES DE EXPOSICIÓN A LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE

Efecto	Elasticidad	Reducción en el número de casos (pob. de 10 millones)
Mortalidad por cohortes	0.00022	2200
Mortalidad de series de tiempo	0.00005	500
Bronquitis crónica	0.0005	5000

Fuente: Elaboración propia con base en el cuadro 103.

Utilizando las Simulaciones Monte Carlo, como una de las técnicas propuestas en la evaluación del costo-beneficio para medidas ambientales (Sparado y Rabl, 2008), se puede estimar la trayectoria esperada del número de casos evitados de muertes por todas las causas y morbilidad por bronquitis ante una reducción de 10% en la exposición a  $PM_{10}$  y ozono (Gráficas 103 - 105), en tres de las zonas metropolitanas del país con mayor concentración y exposición al ozono y  $PM_{10}$ : Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG) y Zona Metropolitana de Monterrey (ZMM). Estas simulaciones se hicieron utilizando las elasticidades para una reducción de 10% en las concentraciones de  $PM_{10}$  (Cuadro 105) y las proyecciones oficiales de población nacional.

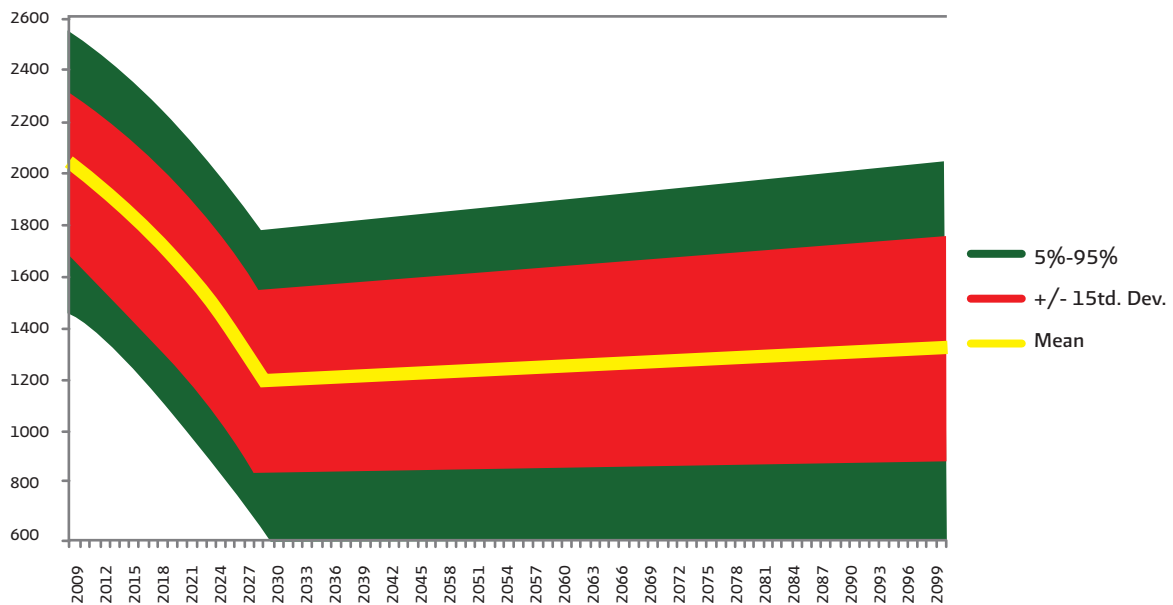
Las Simulaciones de Monte Carlo generaron valores aleatorios en cada punto de la muestra. En el caso de la mortalidad por todas las causas y la morbilidad respiratoria asociada a  $PM_{10}$  y ozono se realizaron distintas simulaciones<sup>59</sup> sobre el número de casos evitados para cada una de las observaciones en el periodo de 2009 a 2100.



<sup>59</sup> Las Simulaciones Monte Carlo se realizaron en el programa @RISK considerando hasta 500 iteraciones para una distribución normal.

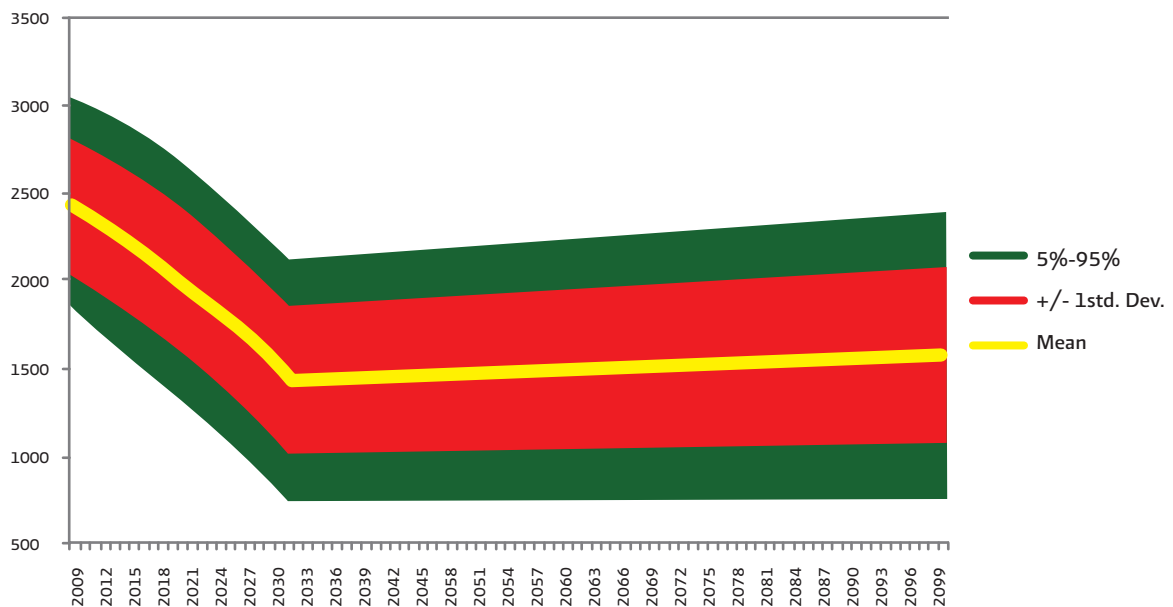


**Gráfica 104. Simulación de Monte Carlo de los casos evitados de morbilidad por bronquitis por una reducción de 10% en PM<sub>10</sub>**



Fuente: Elaboración propia

**Gráfica 105. Simulación de Monte Carlo de los casos evitados de morbilidad total por una reducción de 10% en Ozono**

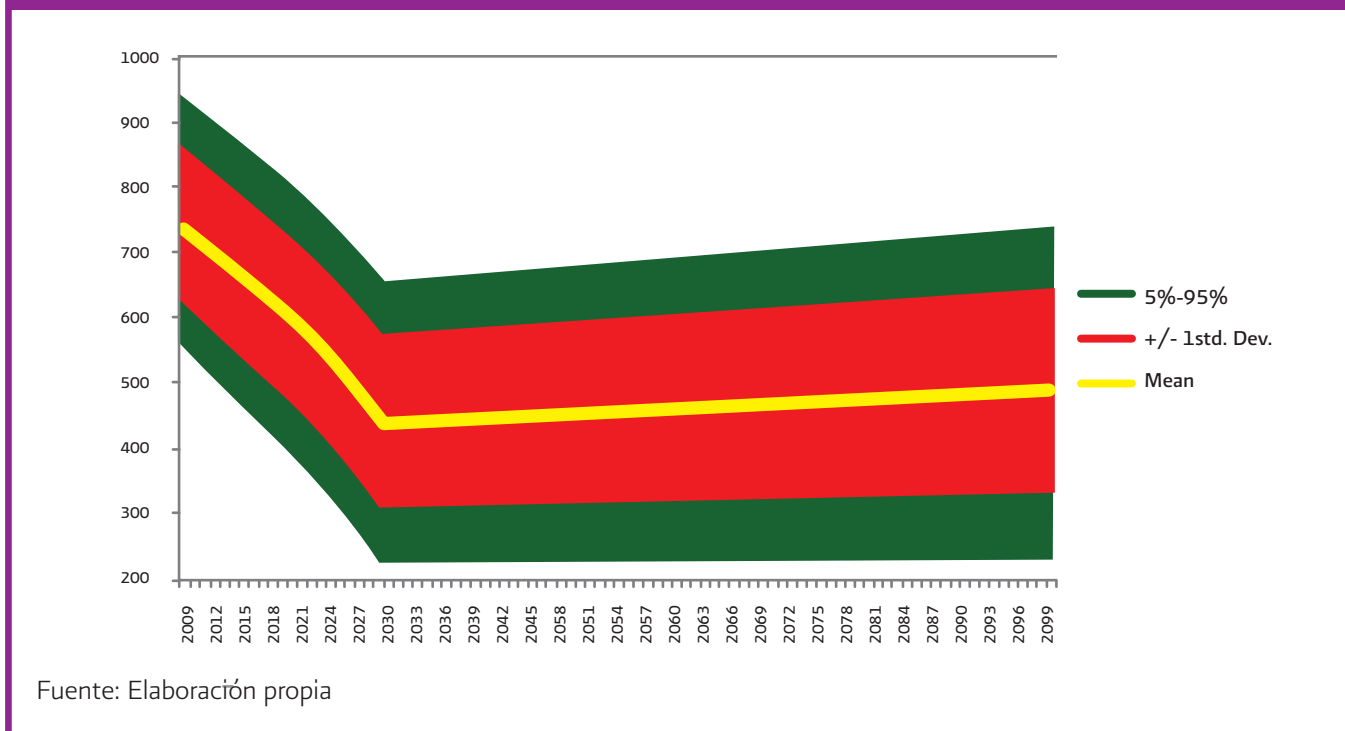


Fuente: Elaboración propia

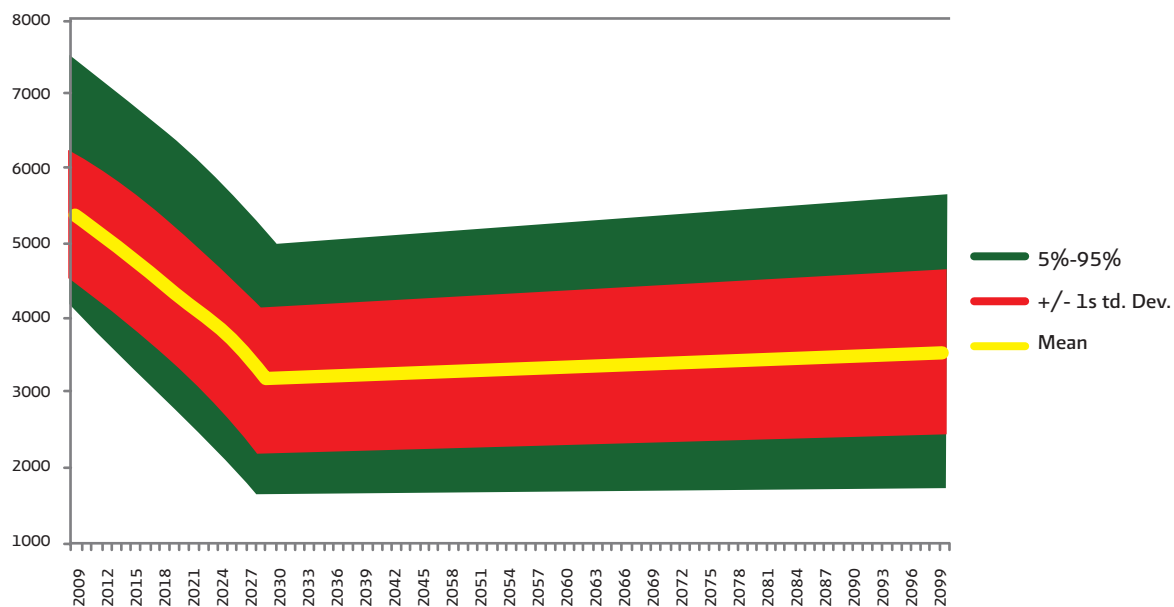
Los resultados de las Simulaciones muestran que con una reducción de 10% en la exposición a  $PM_{10}$  se evitarían en promedio 4.990 casos de mortalidad por todas las causas (sin incluir accidentes y homicidios) y 1.237 casos de morbilidad por bronquitis, para el año 2100 en la ZMVM, ZMG y ZMM. El número de muertes evitadas es de 1.592, cuando se tiene en cuenta una reducción de la misma magnitud en ozono. Para el cambio en ozono se utilizó el coeficiente encontrado por Cesar *et al*, (2002) en un estudio desarrollado para valorar el mejoramiento de la calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de México. Así, el número de casos evitados para cada uno de los efectos analizados (mortalidad y morbilidad) muestra una tendencia decreciente entre 2009 y 2030, a partir del cual se presenta un cambio de tendencia. Esto se puede explicar por el cambio que presenta el input utilizado en las Simulaciones, a causa de las proyecciones de población. Es decir, hasta 2030 se utilizaron las proyecciones publicadas por la CONAPO para cada uno de los Estados del país y a partir de este año se emplearon proyecciones con base en la tendencia que traen las proyecciones oficiales. Ello hace que la tasa de crecimiento de la población en riesgo (input) en las zonas metropolitanas analizadas cambie el comportamiento que traía hasta 2030.

Con igual procedimiento se puede obtener la estimación de la trayectoria esperada del número de casos evitados en las tres zonas metropolitanas del país analizadas para distintos efectos en la salud, utilizando los efectos encontrados a partir del meta-análisis para un aumento de 10 ppb en las concentraciones de ozono (Cuadro 100), de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en las de  $PM_{10}$  (Cuadro 101) y las proyecciones de población de CONAPO. Los casos evitados de mortalidad por todas las causas (excluyendo accidentes y homicidios) se presentan en la Gráfica 106. Para este efecto los resultados indican que se evitarían en promedio 4.990 casos de muertes prematuras en 2100, en las tres zonas metropolitanas señaladas, por una reducción de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en las concentraciones de  $PM_{10}$ . Las muertes por causas respiratorias (Gráfica 107) y los casos de morbilidad respiratoria evitados (Gráfica 108), bajo este mismo escenario, serían en promedio de 3.745 y 2.612 personas respectivamente para el año 2100.

**Gráfica 106. Simulación de Monte Carlo de los casos evitados de morbilidad total por una reducción de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en  $PM_{10}$**

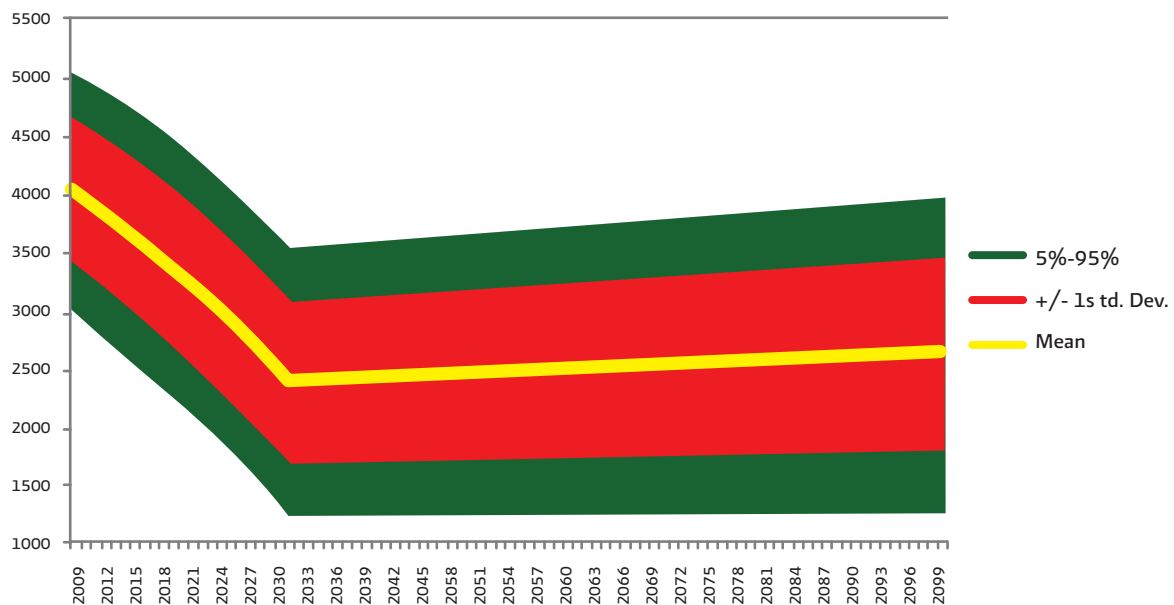


**Gráfica 107. Simulación de Monte Carlo de los casos evitados de morbilidad respiratoria por una reducción de 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en  $\text{PM}_{10}$**



Fuente: Elaboración propia

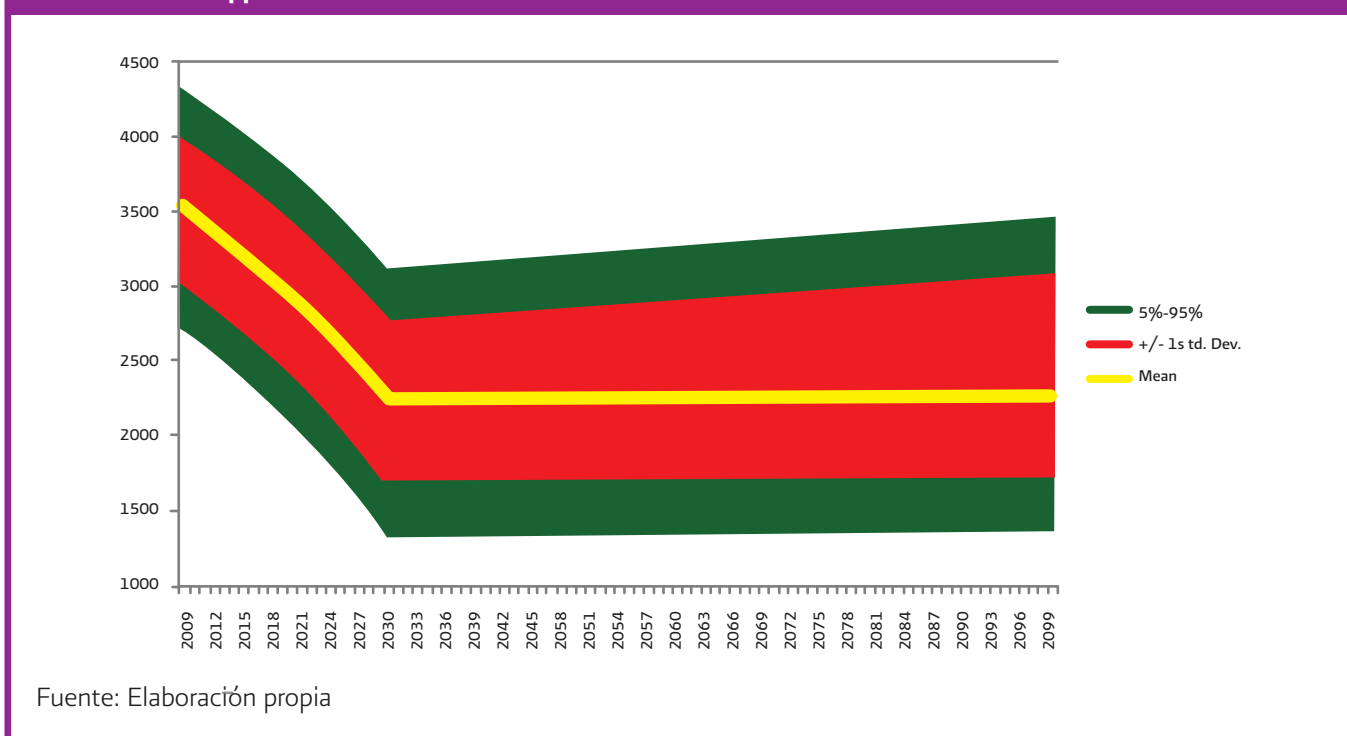
**Gráfica 108. Simulación de Monte Carlo de los casos evitados de morbilidad respiratoria por una reducción de 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en  $\text{PM}_{10}$**



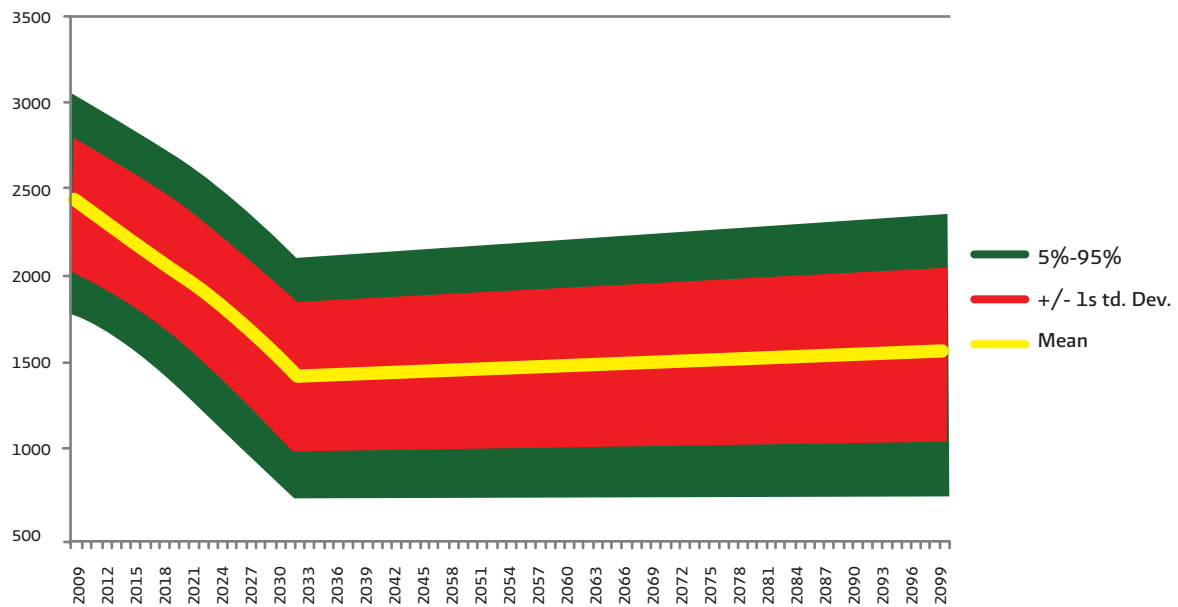
Fuente: Elaboración propia

Como se mostró en los Cuadros 100 y 101, el efecto del ozono sobre la mortalidad y morbilidad respiratoria es menor que el ocasionado por el  $PM_{10}$ , en tal sentido, son también menores los casos evitados en la ZMVM, ZMG y ZMM frente una reducción de 10 ppb en ozono. En las Gráficas 109 y 110 se presentan los casos de muertes por todas las causas y muertes por causa respiratoria evitadas en este escenario, respectivamente. Los resultados muestran que se evitarían en promedio 2.285 casos de muerte prematura para el 2100 de reducirse en 10 ppb las concentraciones de ozono. En el caso de las muertes por causa respiratoria se evitarían en promedio 1.592 muertes para el 2100. En términos de morbilidad respiratoria (bronquitis, síntomas en las vías respiratorias inferiores y superiores) los efectos son mayores, ya que se lograría reducir en 3.745 los casos de estas enfermedades para el 2100 (Gráfica 111), con un escenario como el considerado.

**Gráfica 109. Simulación de Monte Carlo de los casos evitados de mortalidad respiratoria por una reducción de 10 ppb en ozono**

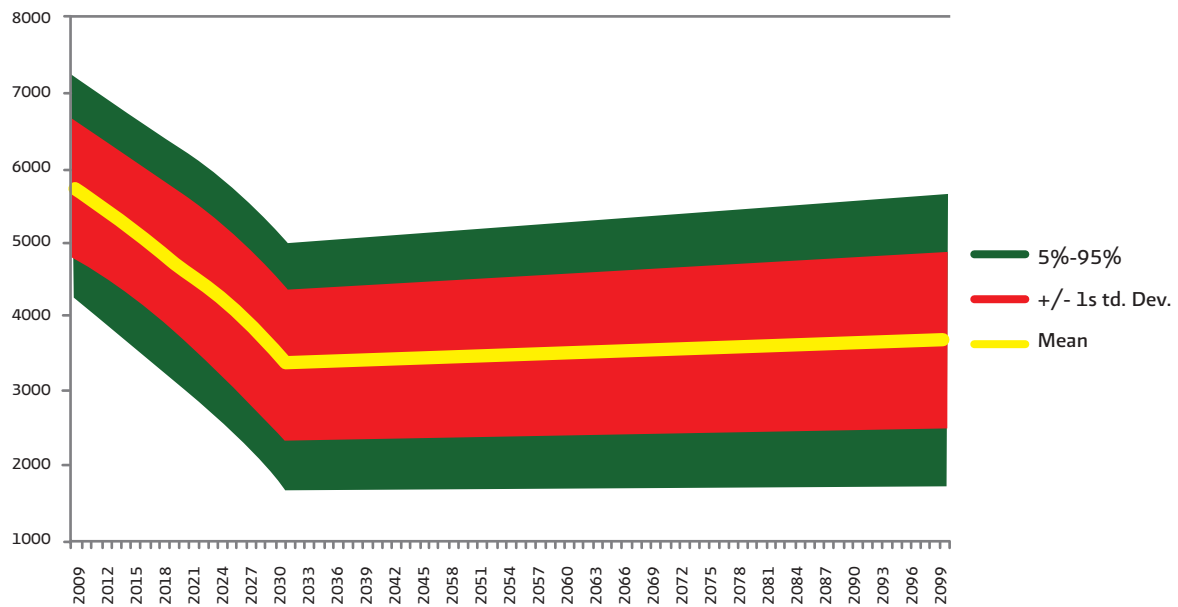


**Gráfica 110. Simulación de Monte Carlo de los casos evitados de mortalidad respiratoria por una reducción de 10 ppb en ozono**



Fuente: Elaboración propia

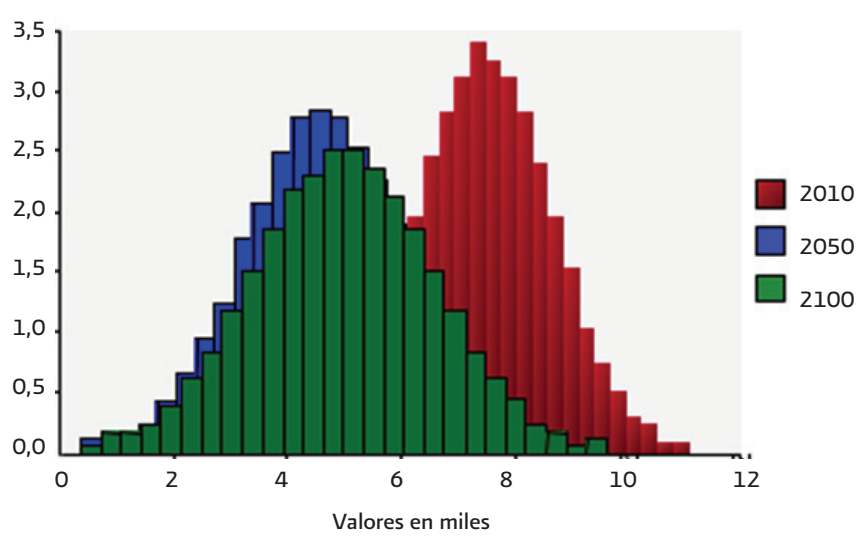
**Gráfica 111 Simulación de Monte Carlo de los casos evitados de morbilidad respiratoria por una reducción de 10 ppb en ozono**



Fuente: Elaboración propia

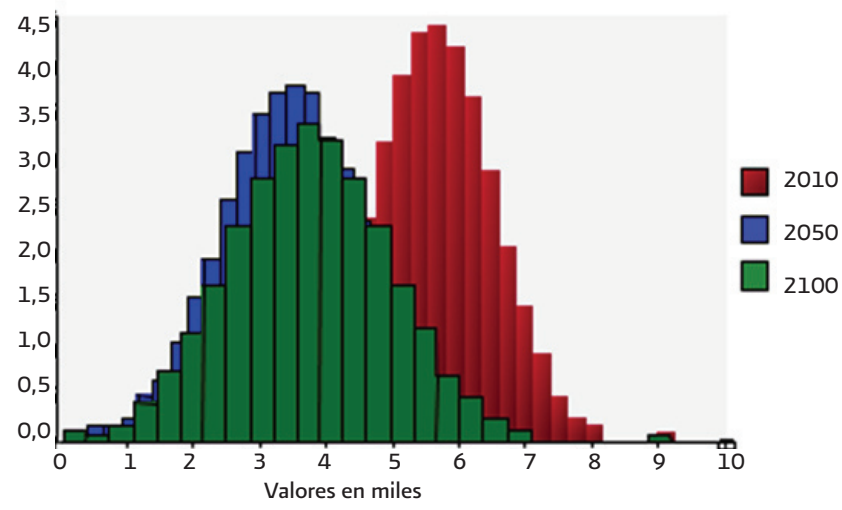
En las Gráficas 112 a la 117 se presentan las distribuciones de frecuencias para cada uno de los efectos en mortalidad y morbilidad encontrados con las Simulaciones de Monte Carlo. Por los motivos señalados anteriormente, la distribución de frecuencia de los casos evitados para el 2010 está más concentrada en valores superiores a la de los años 2010 y 2050.

**Gráfica 112. Distribución de frecuencias de la simulación Monte Carlo para los casos evitados de morbilidad respiratoria por una reducción de  $10 \mu\text{m}/\text{m}^3$  de  $\text{pm}_{10}$**



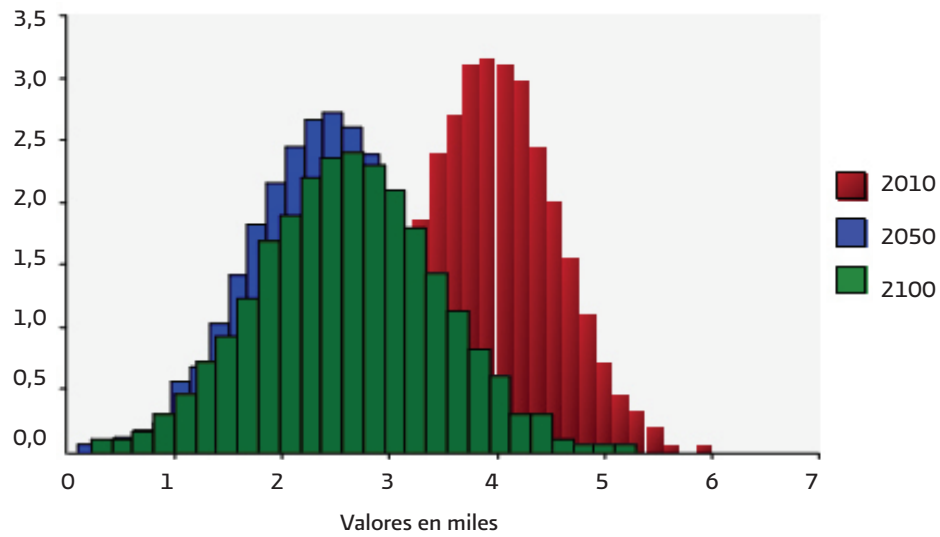
Fuente: Elaboración propia.

**Gráfica 113. Distribución de frecuencias de la simulación Monte Carlo para los casos evitados de mortalidad respiratoria por una reducción de  $10 \mu\text{m}/\text{m}^3$  de  $\text{pm}_{10}$**



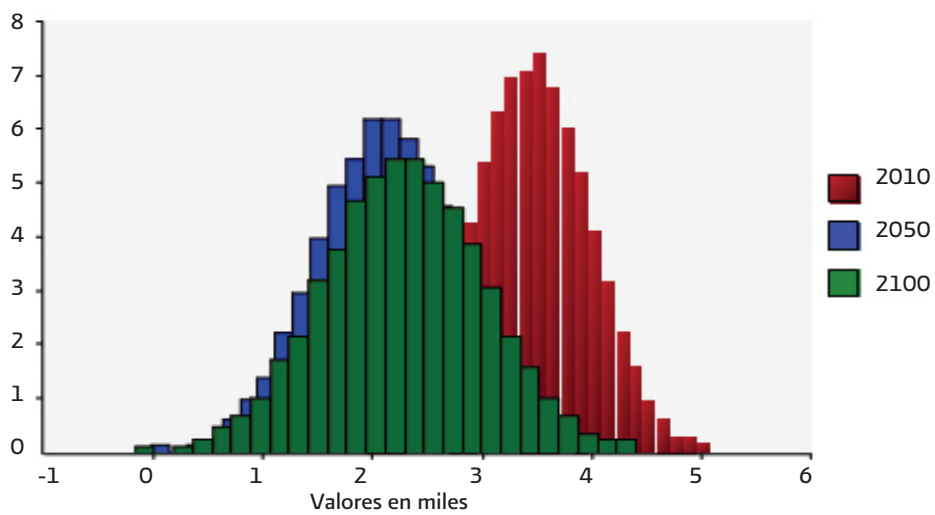
Fuente: Elaboración propia.

**Gráfica 114. Distribución de frecuencias de la simulación Monte Carlo para los casos evitados de morbilidad respiratoria por una reducción de  $10 \mu\text{m}/\text{m}^3$  de  $\text{pm}_{10}$**



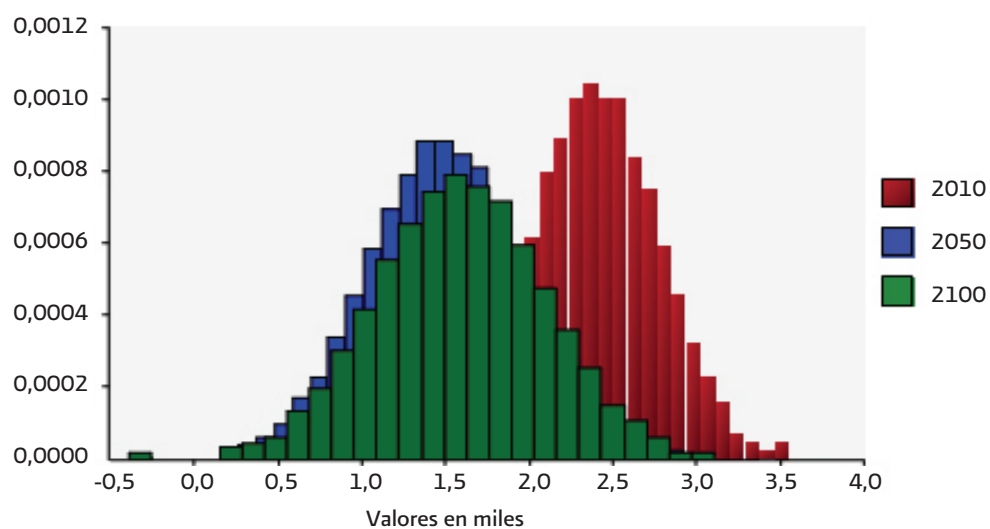
Fuente: Elaboración propia.

**Gráfica 115. Distribución de frecuencias de la simulación Monte Carlo para los casos evitados de mortalidad por todas las causas por reducción de 10 ppb de Ozono**



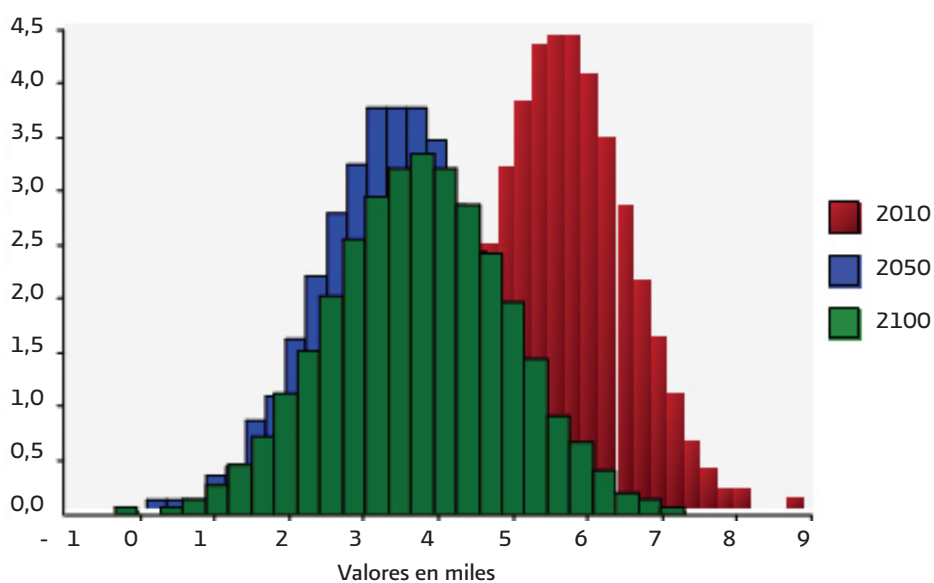
Fuente: Elaboración propia.

**Gráfica 116. Distribución de frecuencias de la simulación Monte Carlo para los casos evitados de mortalidad respiratoria por una reducción de 10 ppb de Ozono**



Fuente: Elaboración propia.

**Gráfica 117. Distribución de frecuencias de la simulación Monte Carlo para los casos evitados de morbilidad respiratoria por una reducción de 10 ppb de Ozono**



Fuente: Elaboración propia.



Una vez estimado el efecto sobre la salud humana por una disminución de las emisiones de los contaminantes, el siguiente aspecto a tener en cuenta es la valoración de cada uno de los efectos en salud considerados. En este sentido es necesario considerar lo complejo que resulta el cálculo del costo de la vida humana y reconocer las controversias que al respecto se han presentado en la literatura internacional. Por lo anterior, en esta evaluación se toman en cuenta únicamente los costos asociados a los días laborales perdidos, atención médica y hospitalización de algunas enfermedades asociadas a la contaminación atmosférica como cáncer pulmonar, enfermedad cardiopulmonar y bronquitis<sup>60</sup>. Así, el valor presente neto de los beneficios por los casos evitados de mortalidad y morbilidad, respectivamente, por las menores emisiones de PM<sub>10</sub> son de 669.676 millones de pesos a precios de 2003, mientras que los beneficios en salud que arrojan las menores emisiones de ozono son de 529.002 millones de pesos, para todo el horizonte de tiempo analizado.

#### 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las principales conclusiones que se desprenden del análisis son:

1. El cuarto informe del IPCC señala que el cambio climático tiene efectos sobre la salud de la población que se manifiestan a través de la mayor morbilidad y mortalidad por olas de calor, aumentos en las enfermedades diarreicas, y cardiorespiratorias, cambios en la distribución de algunos vectores de enfermedades como la malaria y el dengue y aumentos en los niveles de malnutrición, reforzados por los efectos en términos de disponibilidad de agua, aumento de las sequías y la menor productividad de cultivos de consumo básico para algunas poblaciones.
2. Investigaciones realizadas a nivel internacional han evidenciado las consecuencias de las ondas de calor sobre la mortalidad, con mayor intensidad sobre los adultos mayores. Michelozzi *et al.*, (2004) concluyeron que en Roma el número de muertes diarias durante el periodo de olas de calor aumenta en 29.3% en las personas con edades entre 75 y 84 años, llegando a 45.7% en los mayores de 85 años. Estos resultados junto con los encontrados por Borrel *et al.*, (2006) en España, Whitman *et al.*, (1997) en Estados Unidos de Norteamérica y Vandentorren *et al.*, (2004) dejan claro los efectos sobre esta población. En México, se han observado temperaturas superiores a los 40 grados durante el verano en algunos estados del norte del país, con efectos también en mortalidad.
3. Los aumentos en la temperatura también presentan efectos en la salud a través de la mayor transmisión de enfermedades infecciosas. Entre estas, el dengue y la malaria serán las de mayor propagación en la medida que aumente la temperatura y los vectores transmisores encuentren mayores lugares con climas propicios para su transmisión. Diversas investigaciones señalan a África como la región que recibirá los mayores impactos en relación con la malaria: incremento en el 2100 de 16% a 28% de las personas-mes expuestas a través de todos los escenarios de cambio climático (IPCC, 2007). Aunque la evidencia no es concluyente para América Latina, en México se ha observado que en lugares donde no se había presentado el dengue empieza a aparecer.
4. De igual manera, se presentan impactos sobre la salud a partir de gases como el ozono, siendo más preocupante el hecho que estos impactos se intensifiquen con temperaturas más altas. Trabajos como el de Bufalini *et al.*, (1989) señalan que un incremento de cuatro grados de temperatura intensifica, en tres veces, el impacto de las concentraciones de ozono. Estudios epidemiológicos han mostrado ya los efectos adversos que tienen contaminantes como el ozono y el material particulado sobre la salud de la población, particularmente sobre el sistema respiratorio, en especial sobre niños y adultos mayores.

<sup>60</sup> Investigaciones realizadas por el INE señalan los siguientes costos asociados a las enfermedades relacionadas con la contaminación del aire: enfermedad cardiopulmonar (71.726 pesos), cáncer pulmonar (43.321 pesos) y bronquitis (752.975 pesos).

5. Los estimadores combinados encontrados a partir de la extensa literatura internacional que existe al respecto señalan que aumentos en 10 ppb en la exposición a ozono está asociado a un aumento de 0.40% en la mortalidad por todas las causas. Este efecto es mayor sobre la mortalidad infantil (1.2%) y de los adultos mayores (0.50%). A nivel de morbilidad, los resultados del meta-análisis muestran que los efectos de aumentos en la exposición a ozono lo sufren con mayor intensidad las personas que presentan enfermedades respiratorias como el asma, registrándose un aumento de los casos en 10.40%.
6. Al igual que en el caso del ozono, una mayor exposición a las partículas menores a diez micras también se ve reflejado en aumentos en la mortalidad infantil y de adultos mayores, siendo mas severos los efectos adversos de este contaminante. Los resultados obtenidos permiten asociar aumentos de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de  $\text{PM}_{10}$  con un incremento en la mortalidad infantil de 2.79%, en la mortalidad de los adultos mayores de 1.21% y en la mortalidad por todas las causas de 0.68%. Los efectos sobre la morbilidad son mayores en el caso de la población asmática, registrándose aumentos de 2.33% en estas enfermedades.
7. La valoración de los beneficios bajo un escenario de reducción de la exposición a ozono y  $\text{PM}_{10}$ , tomando como base los costos de atención médica, hospitalización y días de actividad laboral perdidos, para enfermedades asociadas a la contaminación atmosférica indican que existen beneficios por los casos de mortalidad y morbilidad evitados valorados en 669.676 millones de pesos a precios de 2003, para un escenario de reducción de la exposición a  $\text{PM}_{10}$  en  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , y de 529.002 millones de pesos, por reducciones en la exposición a ozono en 10 ppb, para todo el horizonte de tiempo analizado.

## RECOMENDACIONES

- a. Es necesario instrumentar políticas públicas que permitan disminuir las emisiones de contaminantes como el ozono y  $\text{PM}_{10}$ , sobre todo bajo el conocimiento que los efectos en la salud se incrementarán con el aumento de la temperatura. Asimismo, se deben diseñar medidas de prevención para la población mayor de 65 años, en Estados donde predominan las altas temperaturas, que permitan enfrentar las olas de calor que regularmente se presentan durante el verano.
- b. Los sistemas de atención médica en las regiones tropicales del país deben contar con los medicamentos y personal profesional que permitan atender enfermedades como el dengue y la malaria, que probablemente comiencen aparecer con las mayores temperaturas.

## PARTE 4: FUENTES DE EMISIONES Y LA ESTRATEGIA DE MITIGACIÓN EN MÉXICO

### 4.1. EL SECTOR ENERGÉTICO EN MÉXICO

#### Puntos fundamentales

El objetivo de este capítulo es analizar el sector energético en México desde la óptica de las emisiones de GEI. Ello se realiza fundamentalmente atendiendo al comportamiento de la demanda de energía total y por combustibles a nivel nacional y por sectores. Las trayectorias y patrones observados en estos sectores son utilizados en la construcción de escenarios de consumo de energía. Los principales resultados muestran que:

Existe una relación importante entre las emisiones de GEI y el sector energético. Es posible entonces identificar relaciones de largo plazo entre la demanda de energía total y por sectores, con el producto nacional y sectorial, así como los precios relativos de la energía y de los combustibles. Las elasticidades ingreso se ubican alrededor de la unidad y las elasticidades precio son negativas pero menores a -0.5.

Bajo el escenario base, es decir con un crecimiento de la economía de 3.5% anual y precios relativos e intensidades energéticas constantes, el consumo de energía a nivel nacional crecería 2.4% anual durante el periodo de 2008 a 2100 y destacando un ritmo mayor en el consumo del sector transporte. Ello con las elasticidades estimadas y sin imponer correcciones por políticas o de ajuste entre oferta y demanda. Considerando una disminución en el nivel de precios relativos de tres por ciento anual, así como una disminución en la intensidad energética del uno por ciento se observan reducciones en los ritmos de los niveles de consumo en todos los sectores aunque se mantiene la tendencia ascendente. Los sectores que muestran una mayor sensibilidad a los precios son el residencial y el comercial en tanto que el resto de los sectores indican una mayor reducción considerando los cambios en la intensidad energética. El transporte, es el sector que muestra una mayor disminución en su consumo de energía ante los cambios en los precios y cambio en la intensidad. Así que una política basada en precios, regulaciones asociadas a una mayor eficiencia vehicular y el apoyo a la innovación tecnológica tendrá efectos importantes en moderar el consumo de energía en este sector, que además uno de los principales emisores de CO<sub>2</sub>.

## 1. INTRODUCCIÓN

La energía es, desde luego, un insumo fundamental en cualquier economía. Sin embargo, las emisiones de los distintos gases de efecto invernadero (GEI) están vinculadas directamente al consumo de combustibles (petróleo, gas y sus derivados) (IPCC, 2007). Así, en México, las emisiones totales de GEI pasaron<sup>61</sup> de un nivel de 425,268 Gg (Gigagramos) equivalentes de CO<sub>2</sub> (tCO<sub>2</sub>e) en 1990 a 553,329 Gg en el 2002 y donde la mayor contribución a las emisiones totales provienen de la producción y el uso de la energía, que anualmente aporta en promedio el 72% de las emisiones totales y el consumo de combustibles fósiles que contribuye, en promedio, con 64% de las emisiones totales (SEMARNAT-INE, 2006). Esta contribución resulta además preocupante atendiendo a la dinámica del consumo de energía<sup>62</sup>. En efecto, en el periodo de 2000 a 2007, la producción de energía primaria se ha incrementado en 8.5%, pasando de 9,703 petajoules (PJ), en 2000 a 10,523 PJ en 2007. En este contexto, la importancia del sector energético tanto por su aporte a la producción doméstica como en lo que se refiere a las emisiones de GEI plantea la relevancia de analizar su evolución y su posible trayectoria hacia el futuro. Por otra parte, en el ámbito de las políticas públicas, el gobierno mexicano ha identificado la necesidad de controlar y reducir las emisiones de GEI, en especial,

<sup>61</sup> Excluyendo las emisiones originadas en el cambio de uso de suelo.

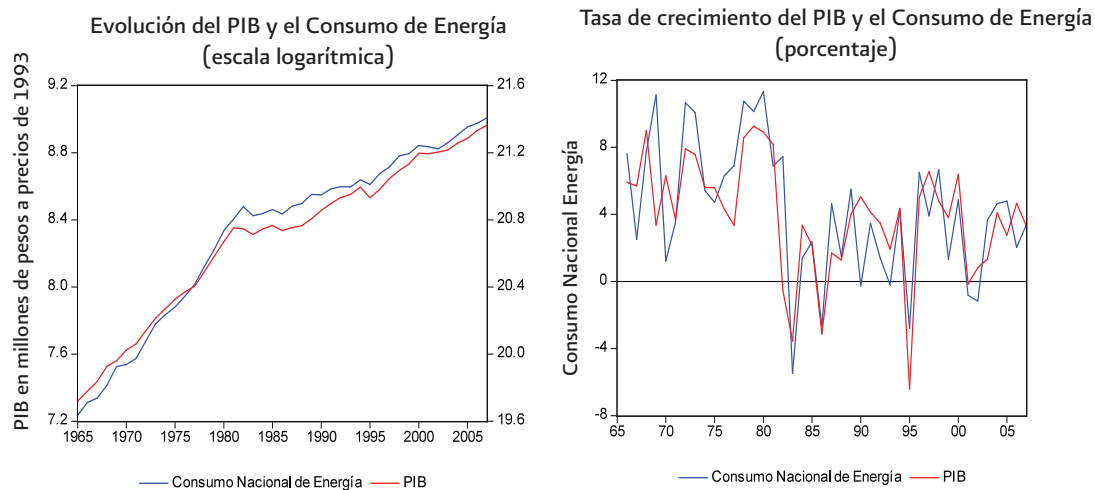
<sup>62</sup> El término consumo y demanda se utilizará indistintamente en este capítulo.

en los sectores donde es posible lograr co-beneficios ambientales, económicos y de competitividad, así como impulsar capacidades de respuesta ante los impactos previsibles del cambio climático. En este sentido, el sector energía resulta crucial en la estrategia de mitigación y adaptación. De este modo, el principal objetivo del presente capítulo es analizar la evolución del consumo de energía a nivel nacional y sectorial, identificando sus principales determinantes con el propósito de construir escenarios prospectivos que sirvan de guía en la evaluación de distintas medidas de políticas públicas.

## 2. MARCO GENERAL SOBRE EL CONSUMO DE ENERGÍA EN MÉXICO

La energía se ha convertido en un insumo fundamental para el funcionamiento de las economías. México no es la excepción, de hecho la evolución del crecimiento económico muestra una alta correlación, tanto en niveles como en tasas de crecimiento, con el consumo nacional de energía (Gráfica 118). Efectivamente, la evolución del consumo de energía muestra una trayectoria ascendente que sigue con un cierto rezago los cambios en la trayectoria del producto. En este sentido, existe una fuerte asociación entre los niveles de producción, de energía y por consiguiente con el nivel de empleo y en los niveles de emisión de GEI (Dinda, Coondoo y Pal, 2000).

Gráfica 118. Evolución del PIB y el Consumo Nacional de Energía



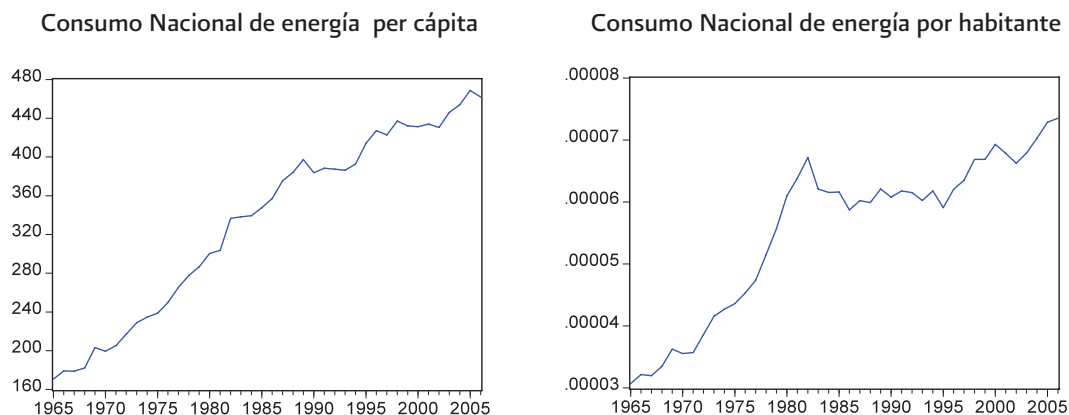
Fuente: Instituto Nacional de Estadísticas Geográficas e Informática (INECI). Sistema de Información Energía (SIE) (<http://sieenergia.gob.mx>)

Los indicadores básicos del consumo de energía muestran que en general existe un paulatino aumento de la intensidad energética *per cápita* en el país no obstante su reducción reciente en términos de producto y en términos de desacoplamiento energético y de descarbonización de la economía:

- El consumo de energía a producto *per cápita* entre 1990 y 2006 aumentó a una tasa de 1% anual.
- El consumo *per cápita* de energía, después de un acelerado crecimiento durante el periodo de 1965 a 1980, se ha mantenido relativamente estable, con una ligera recuperación a partir de 1995. Entre 2000 y 2006 se observa una tasa de crecimiento media anual del orden de 1.1% pasando de un nivel de 69,800 millones de joules por habitante en 2000, a 75,277 millones joules en 2006.

Este nivel de consumo indica que cada habitante demandó en el último año, aproximadamente 20 mega watts, lo equivale a tener encendido un poco más de 500 focos de 100 watts todo el año, y este nivel de energía, con la tecnología actual, requiere el consumo de 1,750 litros de petróleo al año (Gráfica 119).

**Gráfica 119. Indicadores básicos sobre el consumo de energía**

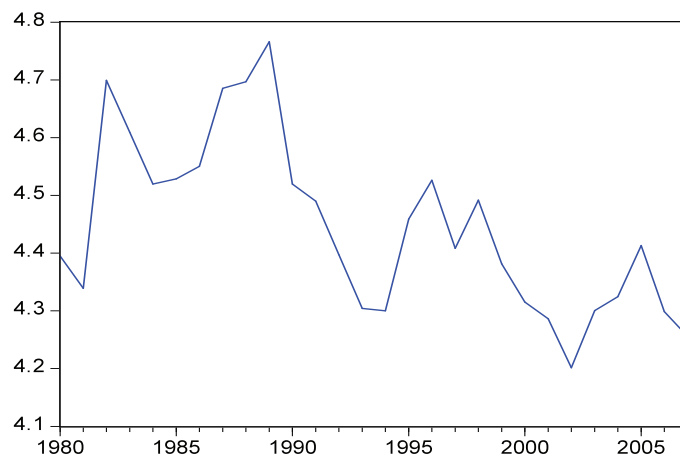


Nota: Consumo nacional de energía per cápita (petajoules/PIB per cápita (pesos por persona) y consumo nacional per cápita de energía (petajoules/habitante).

Fuente: Elaboración propia con datos del Sistema de Información Energética (SIE) (<http://sie.energia.gob.mx>) e Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) ([www.inegi.gob.mx](http://www.inegi.gob.mx))

- La intensidad energética, en el periodo de 1995 a 2007 muestra una disminución con relación a los niveles registrados durante la década de los ochenta. Ello indica que los requerimientos energéticos por unidad de producto han disminuido. Este comportamiento está asociado a la evolución de los precios relativos de los combustibles, a cambios en la composición del producto y al proceso de desacoplamiento energético apoyado en la innovación tecnológica. Actualmente, la intensidad energética oscila en alrededor de 4 megajoules por unidad de producto. En todo caso se observa que la tasa promedio de desacoplamiento energético para el período de 1990 a 2006 es de 0.27% anual (Gráfica 120).

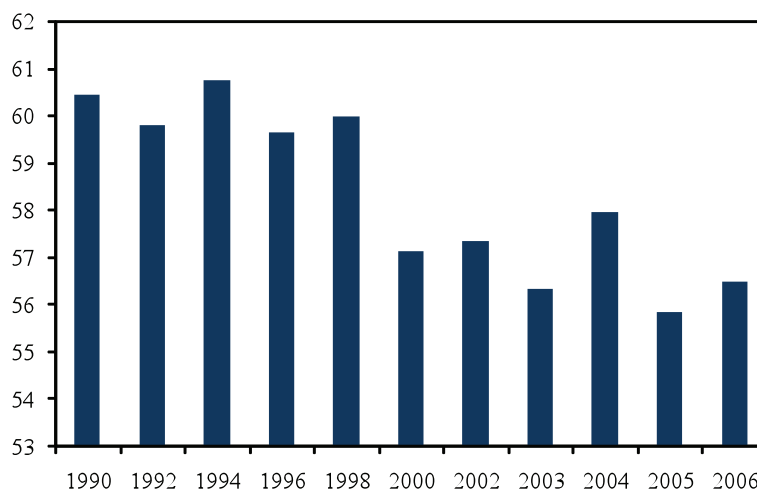
**Gráfica 120. Evolución de la intensidad energética (Megajoules por peso a precios de 1993)**



Fuente: Elaboración propia con datos del Sistema de Información Energética (SIE) <http://sie.energia.gob.mx> e Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) ([www.inegi.gob.mx](http://www.inegi.gob.mx))

- La evolución de las emisiones de  $tCO_2$  e respecto al consumo de energía nacional, también muestra una tendencia descendente a partir del año 2000, indicando que existe un proceso de desacoplamiento de la trayectoria de la energía a las emisiones o de descarbonización de la economía (Gráfica 121).
- Esto es consistente con el argumento de que la cantidad de emisiones por unidad de energía disminuye de 1981 a 2002 (SEMARNAT-INE, 2006). Así, la tasa promedio de descarbonización de la economía es de 0.40% anual entre 1990 y 2002.

**Gráfica 121. Evolución de la intensidad de emisiones a energía (Gg/pj)**

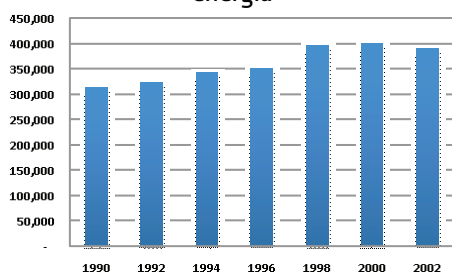


Fuente: Elaboración propia con datos del Sistema de Información Energética (SIE) <http://sie.energia.gob.mx> e Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) ([www.inegi.gob.mx](http://www.inegi.gob.mx))

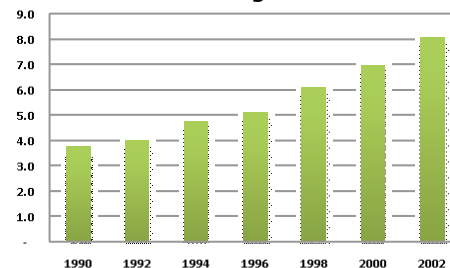
Así, la dinámica de crecimiento del consumo de energía ha estado asociada a una tendencia ascendente de sus emisiones de GEI. En el caso de las emisiones de  $\text{CO}_2$  se han incrementado a un ritmo de 1.7% anual entre 1999 a 2002, en tanto que las emisiones de  $\text{CH}_4$  han aumentado en 1.3% anual, en contraste se observa un acelerado crecimiento de las emisiones de  $\text{N}_2\text{O}$  con un ritmo de 6% anual para el mismo periodo de referencia (Gráfica 122). Las trayectorias indican una gran correlación entre la tendencia del consumo de energía y las emisiones de los GEI, indicando que el sector energético adquiere gran relevancia en el contexto de una política de mitigación. De este modo, puede argumentarse que la trayectoria de las emisiones corresponde, en primer lugar, a la hipótesis de Linder (1961) en donde la demanda de energía está asociado al nivel de desarrollo y se traduce en un cambio en la composición del producto y por tanto en modificaciones en la intensidad energética y de emisiones y al comportamiento de la innovación tecnológica en el país. En segundo lugar, destaca el aumento de la eficiencia energética y la reducción de las emisiones, consecuencia de la estructura energética y la innovación tecnológica.

**Gráfica 122. Evolución de los GEI asociados al Consumo Nacional de Energía: 1990 – 2002 (Gigagramos por año (Gg/año))**

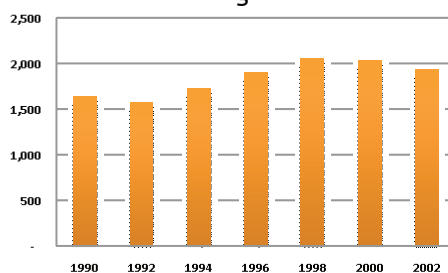
**Emisiones nacionales de  $\text{CO}_2$  por consumo de energía**



**Emisiones nacionales de  $\text{N}_2\text{O}$  por consumo de energía**



**Emisiones nacionales de  $\text{CH}_4$  por consumo de energía**

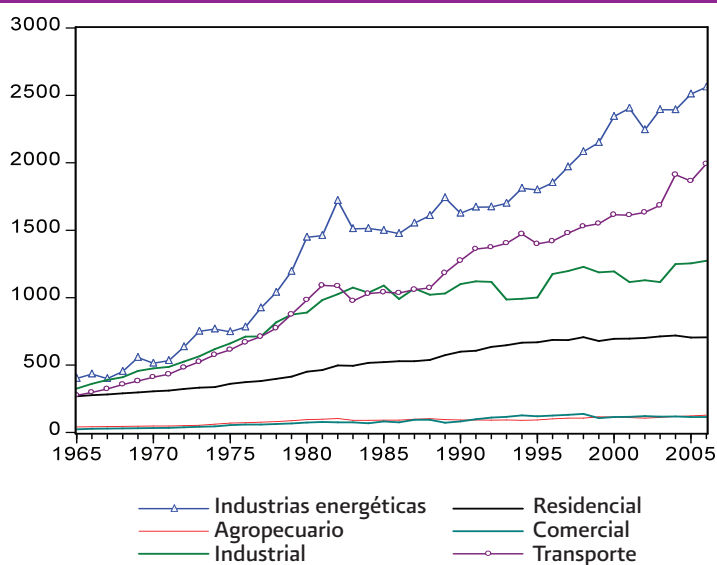


Fuente: Sistema Nacional de Emisiones (SINE), SEMARNAT-INE

### 3. ANÁLISIS SECTORIAL

Durante el periodo de 1960 a 1980 todos los sectores muestran un acelerado crecimiento en los requerimientos de energía aunque este ritmo se modera desde mediados de la década de los noventa. Así, por ejemplo, en el periodo de 1996 a 2006 el sector residencial registra un crecimiento promedio anual de 0.3%, asimismo el sector industrial reporta una tasa promedio anual de 0.8%. Sin embargo, los sectores del transporte y de la industria energética, muestran el mayor crecimiento con tasas del orden de 3.4 y 3.0% anual, respectivamente. En contraste el sector comercial, registra una contracción de 0.9% en promedio anual para el mismo periodo de referencia. (Gráfica 123)

Gráfica 123. Evolución del consumo de energía por sectores (Petajoules)



Fuente: Elaboración propia con datos del Sistema de Información Energética (SIE)

Por otra parte, es posible además identificar algunas tendencias fundamentales en el consumo de energía a través de analizar la intensidad energética<sup>63</sup> por sectores (Gráfica 124):

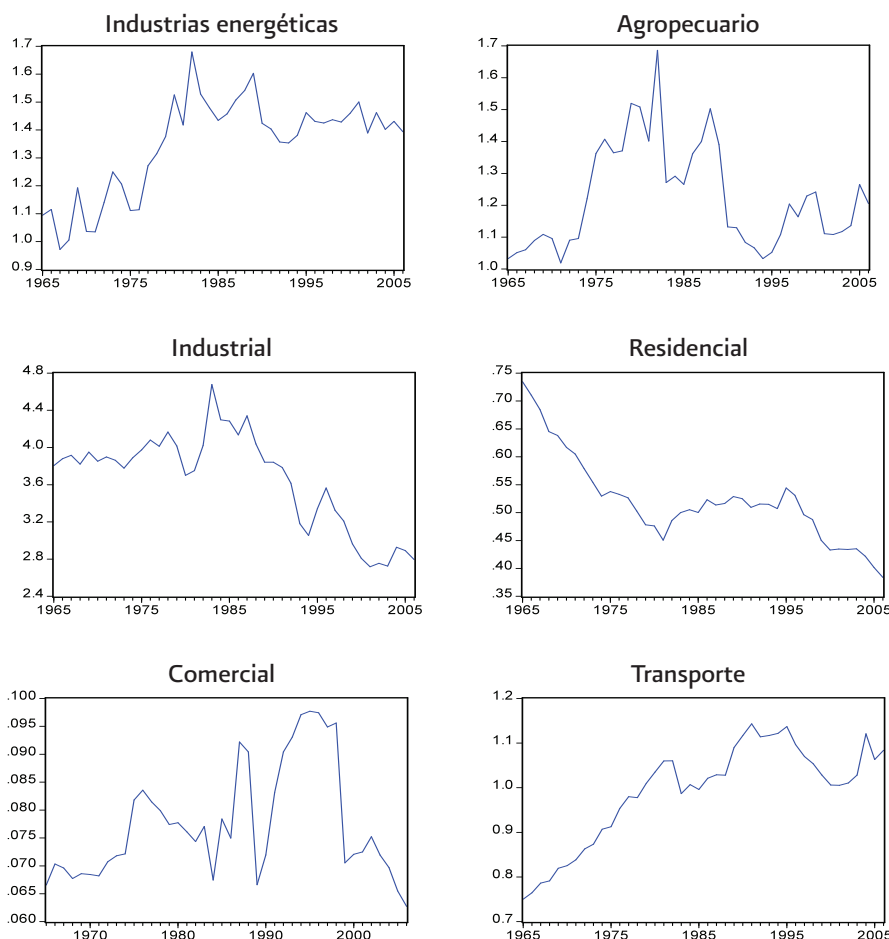
- Las industrias energéticas, desde mediados de los noventa tiende a estabilizar la intensidad energética, indicando que los requerimientos energéticos por unidad de producto se han mantenido relativamente estables y hacia el periodo 2000 a 2006 muestra una disminución de 1.8% anual.
- En el caso del sector agropecuario las oscilaciones son más intensas y las mayores reducciones en la intensidad energética, se presentan hacia finales de los ochenta. Esto significa que en este periodo, se generó un desacoplamiento de 2.95% anual. Sin embargo, este proceso se ha detenido en los últimos diez años ya que el ritmo de desacoplamiento se ubica en sólo 0.85% anual entre 1996 a 2006, lo que muestra un claro estancamiento en la capacidad de innovación tecnológica.

<sup>63</sup> Así mientras algunos autores (Mabey, Hall, Smith y Gupta, 1997) consideran que debe disminuir como consecuencia del progreso técnico, para otros como Hogan y Jorgenson (1991), Jorgenson y Wilcoxon (1998) y Jorgenson (1984) existe la hipótesis de un aumento en el consumo energético en algunos países o Judson, Schmalensee y Stoker (1999) que sostienen que estas intensidades son específicas por sector considerando que la industria tiene una intensidad decreciente y el consumo una creciente.



- En el sector industrial se registra un fuerte descenso en la intensidad energética desde mediados de la década de los ochenta hasta 1993, a un ritmo de 1.1% anual. Esta tendencia se ha mantenido hasta el 2006 pero a un menor ritmo del orden de 0.57% anual.
- El consumo de energía del sector residencial con respecto al PIB total ha mantenido una tendencia descendente. Esto es, se requieren cada vez menos unidades de energía por unidad de producto, de hecho el ritmo de desacoplamiento en el periodo de 2000 a 2006 se ha mantenido en 2% anual.
- El sector comercial, muestra fuertes oscilaciones en la trayectoria de la intensidad durante la década de los ochenta y los noventa, que no permiten identificar una trayectoria en el período de análisis. Sin embargo, desde 1996 donde se ubica el valor más alto se observa una clara disminución en la intensidad energética con un ritmo de desacoplamiento de 3% anual, siendo la más alta en relación al resto de los sectores.
- El sector transporte muestra fuertes oscilaciones, así, inicialmente se observa una clara tendencia ascendente en la intensidad energética que se revierte, parcialmente, hacia mediados de la década de los noventa. De hecho en el periodo de 1990 a 1999 se registró una disminución del orden de 0.9% en promedio anual. Sin embargo, a partir de 2000 a 2006 nuevamente se revierte esta tendencia con un crecimiento de 1.2% anual en la intensidad energética. De este modo, no obstante estas oscilaciones se observa una estabilización relativa de su crecimiento a partir de 1995. Es importante, destacar que el sector transporte, representa aproximadamente el 24% del Consumo Nacional de Energía, y se estima que en 2002 el consumo de energía de este sector fue de 1,605 PJ; de donde el 91% se concentró en el transporte automotor (INE, 2006). En este sentido, el principal combustible utilizado fue la gasolina (65% de los requerimiento del sector transporte), que aumentó su consumo a un ritmo de 2.1% anual en el periodo de 1990 a 2002.

**Gráfica 124. Intensidad energética por sectores (Megajoules/unidad de producto)**



Fuente: Elaboración propia con datos del Sistema de Información Energética (SIE) (<http://sie.energia.gob.mx>) y del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) ([www.inegi.gob.mx](http://www.inegi.gob.mx))

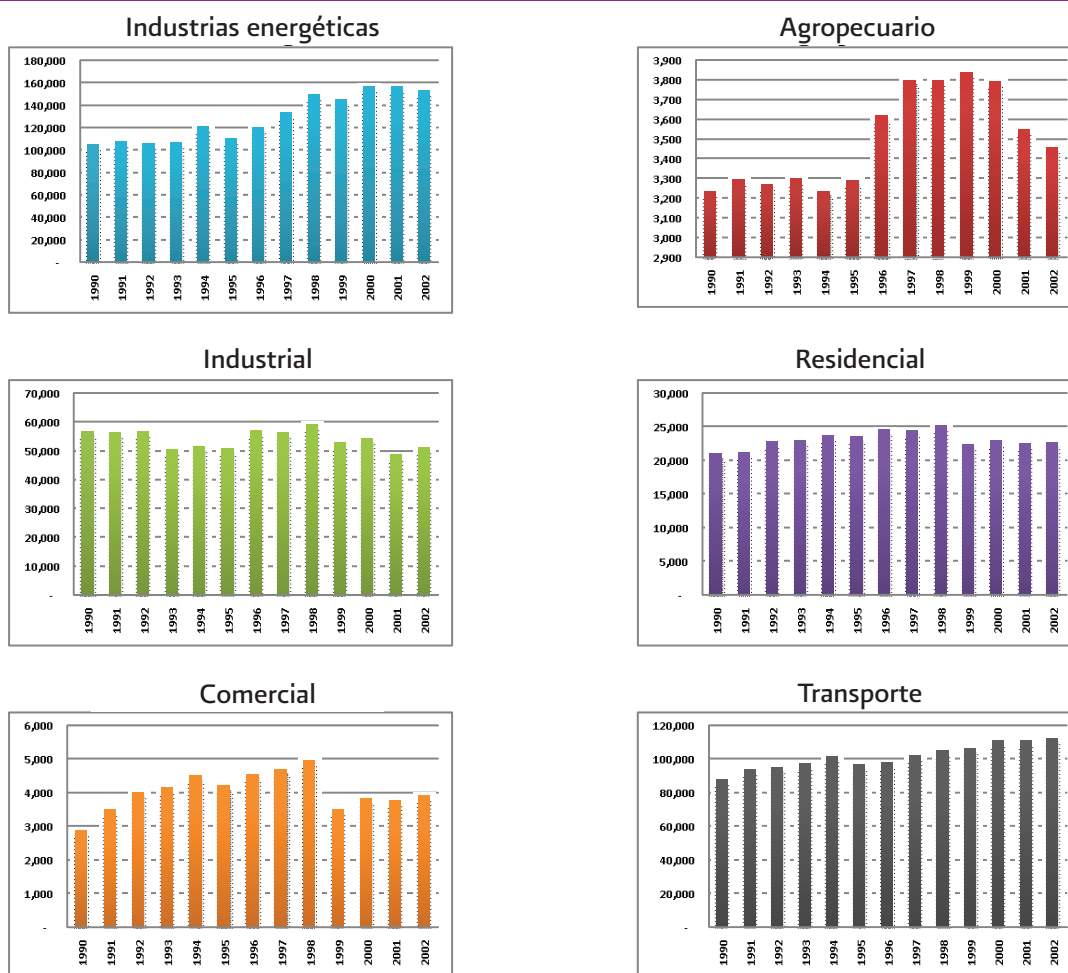
La dinámica del sector de energía se refleja en la cantidad de emisiones de GEI que arrojan a la superficie. Los datos registrados por la SEMARNAT y el INE se muestran en la Gráfica 125. El análisis de las emisiones de CO<sub>2</sub> por sector energético indican que:

- El sector transporte tuvo un incremento en las emisiones de GEI, medidas en tCO<sub>2</sub>e, a una tasa del 2% anual, pasando de 88 millones de toneladas en 1992 a 112 millones de toneladas en 2002. Ello significa que para ese año representa el 32% del total de emisiones de la energía.
- El sector industrias energéticas tuvo una tasa de crecimiento anual promedio de 2.9%. Este sector representa el 44% de las emisiones totales de energía en el año 2002.
- Para el caso del sector industrial la trayectoria de las emisiones de CO<sub>2</sub> presenta una tendencia decreciente a un ritmo de 0.80% anual, además de que su participación porcentual con respecto a las emisiones totales del sector energético, ha disminuido aproximadamente 6%, pasando de 20.5 a 14.8 de 1990 a 2002. Durante este periodo de análisis el sector industrial ha sido el único que ha disminuido sus emisiones de CO<sub>2</sub>.

- El sector agropecuario, ha mantenido una tendencia ascendente en la cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> con una tasa de crecimiento anual de 0.51%.
- El sector residencial, se comporta en forma similar al caso del sector agropecuario, ya que presenta una tasa de 0.57%.
- Finalmente se ha presentado un aumento de 2.4% cada año en las emisiones del sector comercial, es decir, se incrementaron en cerca de un millón 600 mil toneladas equivalentes comparando las emisiones de 1990 y 2002.

Así, en conjunto las intensidades energéticas que no muestran una clara tendencia descendente corresponden al transporte y a las industrias energéticas.

Gráfica 125. Emisiones de CO<sub>2</sub> por sector energético: 1990 - 2002 (Gigagramos (Gg))



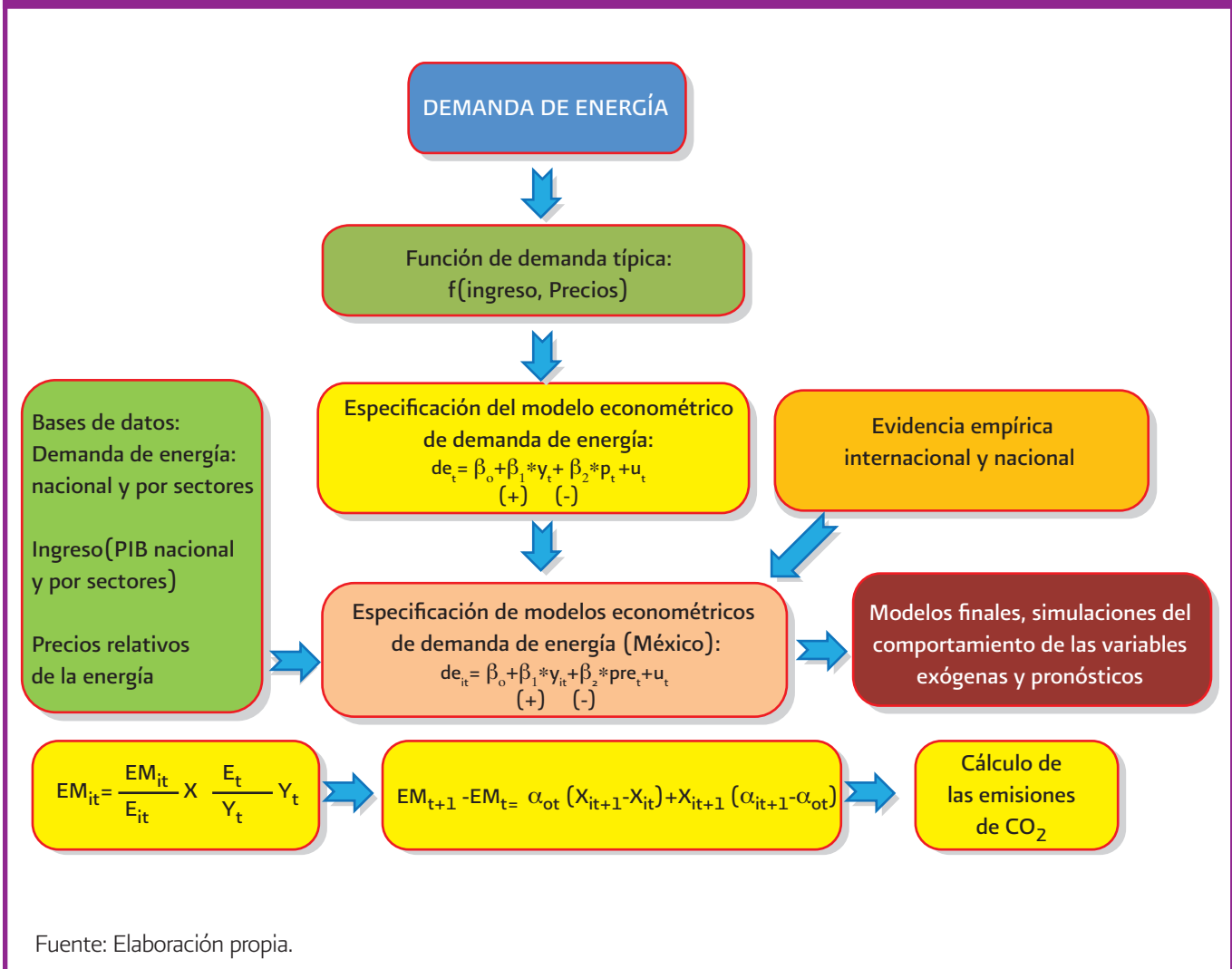
Fuente: (SEMARNAT-INE) (2006), Inventario Nacional de Emisiones de Gases Efecto Invernadero: 1990-2002.

## 4. ESCENARIOS DE CRECIMIENTO DE LA DEMANDA DE ENERGÍA

La evaluación de diferentes medidas de política pública, con el objetivo de mitigación, requiere la construcción de la trayectoria tendencial o escenario base (*business as usual –BAU*) de la demanda de energía y su impacto en la demanda de combustible de origen fósil. Este escenario se utiliza como referencia o de comparación ante distintas medidas de política, como cambio en los precios relativos de la energía o medidas que mejoren la eficiencia en el uso de la energía. Desde luego, la construcción del BAU requiere definir la trayectoria de las variables y factores más relevantes que inciden en la evolución de la demanda de energía en sus diferentes sectores.

La construcción de escenarios se realizó con base en la especificación y estimación de distintos modelos econométricos. Un primer modelo econométrico estima la trayectoria del consumo de energía a nivel nacional en función del nivel de ingreso, los precios relativos de la energía. Este modelo permite obtener el impacto agregado de un cambio en los precios relativos de la energía y del nivel de ingreso, aproximado por el PIB de la economía mexicana. Adicionalmente, se construyó un bloque de modelos para cada uno de los sectores demandantes de energía, también en función de los precios relativos de la energía y el nivel de producto sectorial asociado, que se resuelven de manera simultánea con el primer modelo a fin de obtener resultados consistentes entre los sectores y el consumo de energía agregado. Un tercer bloque incluye como variable explicativa el nivel de intensidad energética tanto a nivel nacional como por sectores, lo que permite analizar los impactos en la demanda de energía ante cambios en la intensidad energética, como una aproximación, por ejemplo, de la innovación tecnológica (Figura 16). Finalmente, las trayectorias de ambos bloques permiten distinguir entre efectos en precios relativos, ingreso e intensidad energética.

Figura 16. Esquema de los modelos econométricos sobre la demanda de energía



#### 4.1 PRINCIPALES RESULTADOS DE LA ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA DE ENERGÍA

La demanda nacional de energía<sup>64</sup>, para el caso mexicano se especificó tanto a nivel nacional como por sectores (industrias energéticas, el agropecuario, el industrial, el residencial, el comercial y el transporte) con base en una función de demanda donde el consumo de energía depende del ingreso y los precios relativos de la energía.

$$(27) \quad ce_{it} = \beta_0 + \beta_1 * y_{it} + \beta_2 * pre_{it} + u_t$$

<sup>64</sup> Véase Kraft y Kraft (1978), Yu y Hwang (1984), Erol y Yu (1987), Engsted y Bentzen (1993), Glasure y Lee (1997), Stern (2000), Glasure (2002), Hondroyannis, Lolos y Papapetrou (2002), Soytas y Sari (2003), Stern y Cleveland (2003), Galindo (2005), Galindo y Sánchez (2005) y Galindo y Caballero (2007).

En el Cuadro 106 se reportan los resultados de la estimación de las elasticidades precio e ingreso de largo plazo de la demanda de energía a nivel nacional y por sectores.

## CUADRO 106. ECUACIONES NORMALIZADAS DE LA DEMANDA DE ENERGÍA NACIONAL Y POR SECTORES

Coefficiente	$cne_t$	$ceie_t$	$cea_t$	$cei_t$	$cer_t$	$cec_t$	$cet_t$
$\beta_0$	-15.892	-7.441	-11.979	-8.432	-4.975	-10.597	-12.916
$\beta_1$	1.170	0.881	0.865	0.792	0.550	0.760	1.049
$\beta_2$	-0.156	-0.158	-0.251	-0.328	-0.236	-0.222	-0.397

Notas: Las letras en minúsculas representan los valores en logaritmos naturales. Periodo 1966 – 2006.

El análisis de los resultados de estas elasticidades permite identificar los siguientes puntos:

- La demanda nacional de energía muestra una elasticidad ingreso superior a la unidad, confirmando la estrecha relación entre las trayectorias del producto y el nivel de consumo. Las elasticidades precio, reporta un valor muy bajo de -0.16.
- En el caso de la demanda de industrias energéticas se presenta una elasticidad ingreso cercana a la unidad y nuevamente la elasticidad precio sigue siendo muy baja y similar a la estimada a nivel nacional.
- El sector agropecuario e industrial muestran que existe una elasticidad ingreso de 0.86 y 0.80 aproximadamente así como un coeficiente de precios bajo. Destaca que la elasticidad precio del sector industrial es de las más elevadas no obstante que sigue siendo inelástica.
- Para el sector residencial y comercial las elasticidades ingreso indican una relación por arriba del 0.5, este resultado es relativamente baja en comparación con los otros sectores. Por su parte, las elasticidades precio, de manera general, están entre -0.22 y -0.23.
- Finalmente el sector transporte tiene una elasticidad ingreso superior a la unidad y una elasticidad precio baja pero superior a la de otros sectores.

Las estimaciones a corto plazo, muestran un buen ajuste respecto a los valores observados, como se muestra en la Gráfica 126.

**Gráfica 126. Valores actuales, estimados y residuales de la demanda de energía nacional y por sectores: 1965 – 2006**



Así, las proyecciones se basaron en estas elasticidades y en todo caso la discrepancia estadística se acumula a la diferencia entre energía primaria y aquella considerada como oferta real. A fin de obtener una trayectoria base sobre las demandas de energía estimadas, se realizaron los siguientes supuestos sobre las variables exógenas de los modelos econométricos, que definen el escenario base. Cabe mencionar que no se realizaron ajustes por cambios de política pública o por restricciones de oferta o ajustes de demanda. En este sentido, las simulaciones sólo son indicativas.

#### **ESCENARIO BASE DE DEMANDA DE ENERGÍA:**

- Se asume un crecimiento del producto del 3.5% en promedio anual en el periodo 2008 a 2100, para el PIB nacional.
- El crecimiento en el PIB industrial es de 2.8% anual.
- El sector agropecuario crece a 2.8% promedio anual.
- Se asume un crecimiento de 3.7% en sector comercial.

- El crecimiento en el sector transporte es de 6.0% anual.
- No existen cambios en los precios relativos de energéticos.
- No existen cambios en las intensidades energéticas.

#### ESCENARIO 1 DE DEMANDA DE ENERGÍA:

- Se asume un crecimiento del producto del 3.5% en promedio anual en el periodo 2008 a 2100, para el PIB nacional.
- El crecimiento en el PIB Industrial es de 2.8% anual.
- El sector agropecuario crece a 2.8% promedio anual.
- Se asume un crecimiento de 3.7% en sector comercial.
- El crecimiento en el sector transporte es de 6.0% anual.
- Cambio en precios relativos de energéticos de 3% anual.
- No existen cambios en las intensidades energéticas.

#### ESCENARIO 2 DE DEMANDA DE ENERGÍA:

- Se asume un crecimiento del producto del 3.5% en promedio anual en el periodo 2008 a 2100, para el PIB nacional.
- El crecimiento en el PIB Industrial es de 2.8% anual.
- El sector agropecuario crece a 2.8% promedio anual.
- Se asume un crecimiento de 3.7% en sector comercial.
- El crecimiento en el sector transporte es de 6.0% anual.
- Cambio en precios relativos de energéticos de 3% anual.
- Cambio en las intensidades energéticas de 1% anual.

Asimismo con estos escenarios se estimaron las bandas de probabilidad o *Fan Chart*<sup>65</sup> para dichas proyecciones. Los resultados para los diversos escenarios se presentan a continuación:

### CUADRO 107. VALORES PRONOSTICADOS Y BANDAS DE PROBABILIDAD PARA LAS TASAS DE CRECIMIENTO DE LA DEMANDA DE ENERGÍA NACIONAL Y POR SECTORES: 2008 – 2100 (TASAS DE CRECIMIENTO)

Sector	Escenario Base	Escenario 1 Precios	Escenario 2 Intensidad
Nacional	2.4	1.8	1.0
Industrias energéticas	1.7	1.5	1.1
Agropecuario	1.0	0.7	0.2
Industrial	1.0	0.7	0.2
Residencial	1.1	0.5	0.9
Comercial	1.6	0.5	1.0
Transporte	2.4	1.7	0.9

Fuente: Elaboración propia

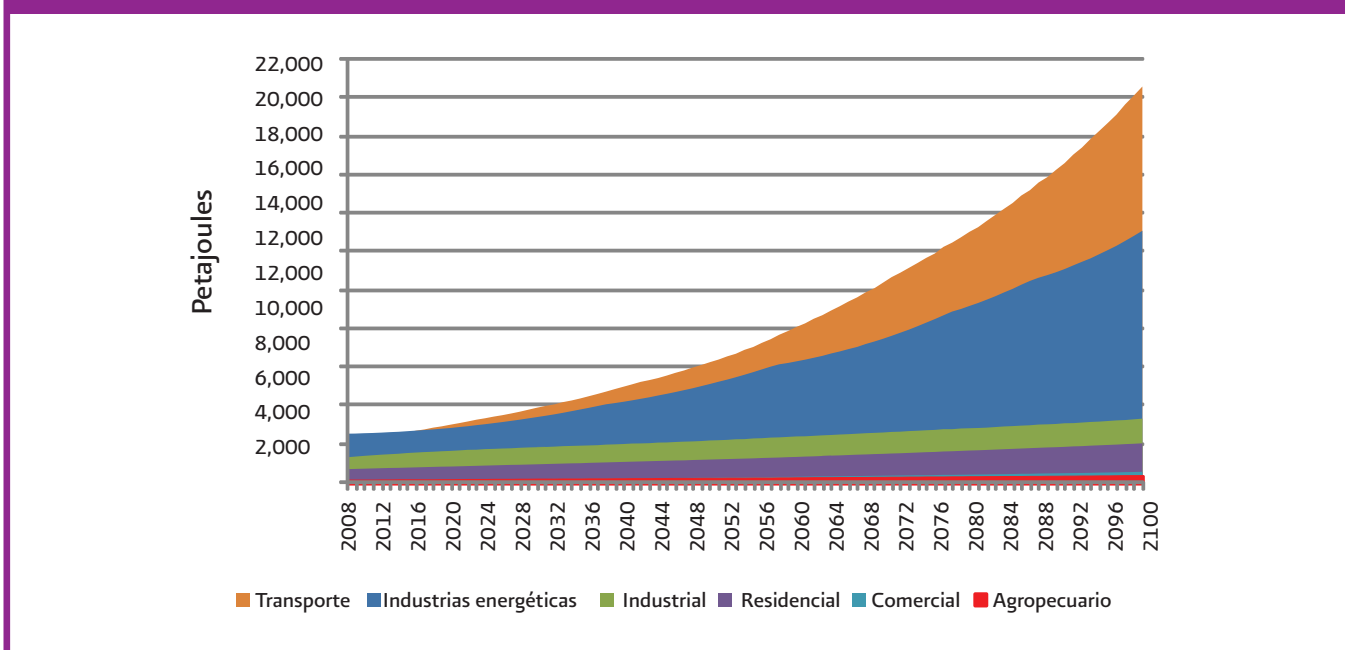
<sup>65</sup> Para una revisión de la metodología véase Britton, Fisher y Whitley (1998), Julio (2006) y Ericsson (2002)



### ESCENARIO BASE DE CONSUMO DE ENERGÍA:

- Los resultados sobre la trayectoria esperada del consumo nacional de energía, bajo el escenario base, indican un ritmo de crecimiento del 2.4% anual, para el periodo de 2008 a 2100. De tal forma que, de no modificarse la estructura actual de consumo de energía y los requerimientos por sectores, hacia el final del presente siglo los niveles de consumo serán substancialmente mayores a los actuales.
- Los resultados sintetizados en el Cuadro 107 y (Gráfica 127), permiten observar un grupo de sectores, que muestran un crecimiento diferenciado respecto al consumo agregado. Así, por ejemplo los sectores agropecuario e industrial, registran un crecimiento del orden de uno por ciento anual para el periodo de 2008 a 2100. En contraste los sectores que ejercerán una mayor presión sobre los recursos energéticos serán el sector transporte que muestra un acelerado ritmo de crecimiento de 2.4% anual y el sector de las industrias energéticas con 1.7% para el periodo de 2008 a 2100.
- El tercer sector en importancia, por su dinamismo en términos de la demanda de energía, será el comercial con una tasa promedio de 1.6% anual para el periodo de referencia. El sector residencial también se destaca con un crecimiento del 1.1% anual.
- Estos resultados muestran que los sectores prioritarios para la aplicación de políticas de control a fin de regular el consumo son el transporte y las industrias energéticas, que además representan la mayor parte del consumo de energía.

Gráfica 127. Consumo de energía por sectores bajo el escenario base: 2008 – 2100 Petajoules

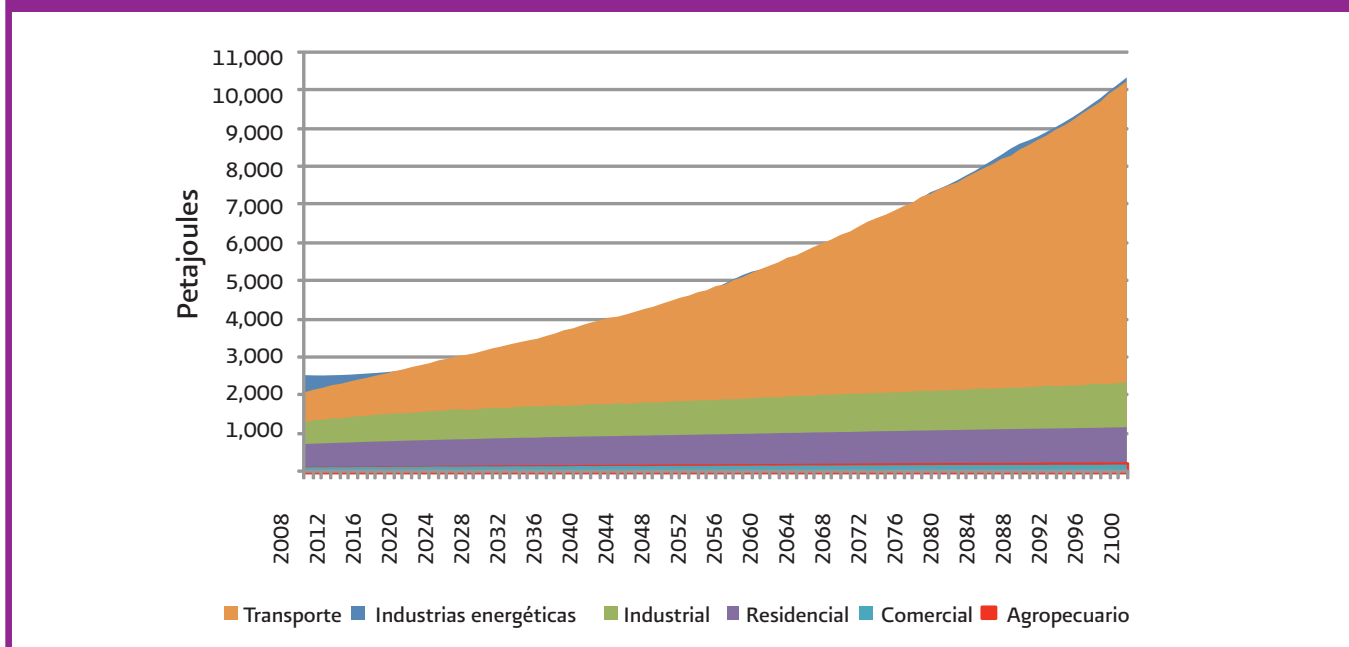


### ESCENARIO 1 DE CONSUMO DE ENERGÍA:

- A nivel nacional se observa una disminución bajo un escenario que considera una política de precios más estricta. El resultado, para los siguientes años muestra un crecimiento promedio anual del orden de 1.8%, lo que permitiría reducir en 0.6 puntos porcentuales el ritmo de crecimiento de la demanda y por tanto reducir hasta en un 15% la demanda de energía, con respecto al escenario base (Gráfica 128).

- Bajo este escenario, las industrias energéticas y el sector transporte mostrarían los ritmos de crecimiento más altos respecto al resto de los sectores. En efecto, para las industrias energéticas el crecimiento sería 1.48% anual de 2008 a 2100 y en el caso del transporte de 1.73% anual. No obstante, con esta política de precios se lograría hasta una reducción del 26% sobre el escenario base.
- El grupo de sectores con un menor ritmo de crecimiento serían, el agropecuario con un 0.73% anual, el industrial con 0.66% y en el caso de los sectores residencial y comercial las tasas de crecimiento serían del orden de 0.53 y 0.54%, respectivamente.

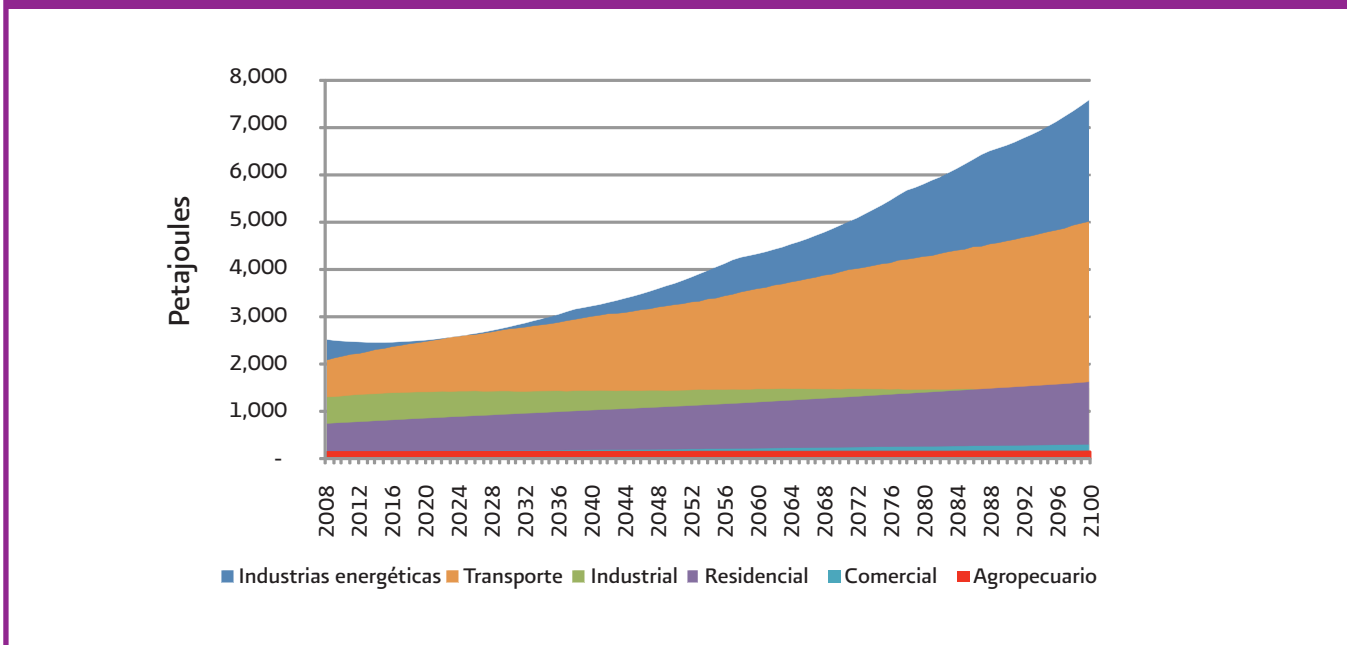
**Gráfica 128. Consumo de energía por sectores bajo el escenario 1: 2008-2100 Petajoules**



### ESCENARIO 2 DE CONSUMO DE ENERGÍA:

- Considerando un escenario con un cambio en las intensidades energéticas, se observa una reducción sustancial en los niveles de consumo de todos los sectores. La demanda nacional de energía proyecta un crecimiento de 0.96% anual.
- Las industrias energéticas registran una tasa de crecimiento del 1.14% anual para el presente siglo lo que representa el mayor ritmo de crecimiento a nivel de subsectores, seguidas del sector comercial con una tasa de 0.96% y el transporte con 0.90% anual. El sector residencial muestra un ritmo de crecimiento de 0.87% (Gráfica 129).

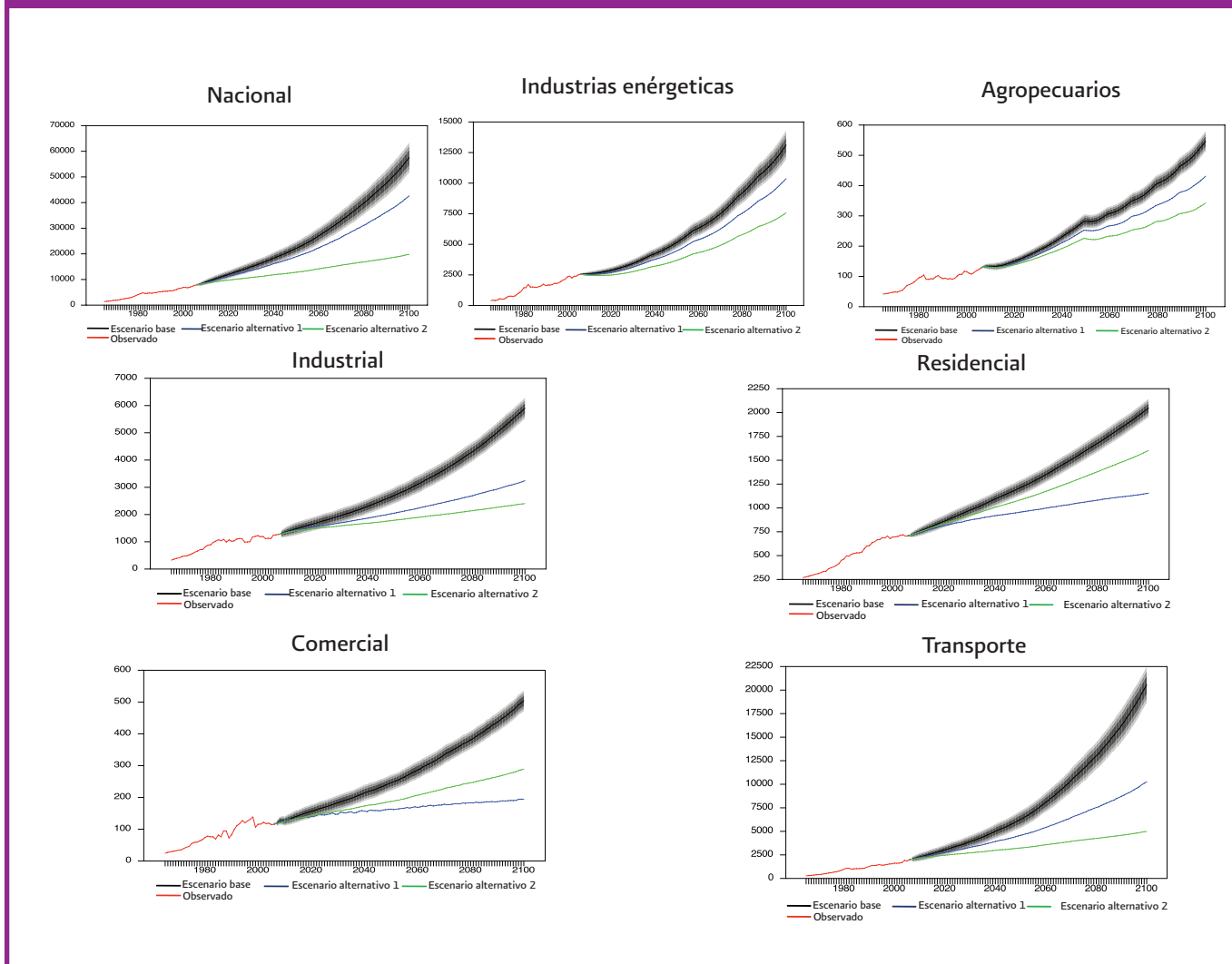
Gráfica 129. Consumo de energía por sectores bajo el escenario 2: 2008-2100 (Petajoules)



Con base en los modelos econométricos se realizaron simulaciones estocásticas sobre las trayectorias de los consumos de energía esperados, bajos los distintos escenarios. La representación gráfica en las simulaciones, corresponde a las Gráficas 130 "Fan Chart". Los principales resultados muestran que:

- En el caso del Consumo Nacional de Energía, bajo este escenario, se espera que el ritmo de crecimiento se ubique en un rango de 1.5 a 3.5% anual.
- En el caso de las industrias energéticas, los resultados son similares en comparación con el comportamiento de la energía nacional; así, se espera que el ritmo de crecimiento bajo el escenario base se ubique en un rango de 1.3 a 2.5%.
- Los escenarios del sector industrial, indican que se espera que el crecimiento del sector se ubique en un rango de 0.7 a 2.4% anual, muy similar la dinámica del sector agropecuario.
- Sin embargo, es importante considerar que el sector industrial representa el 17% del consumo total de energía en tanto que el sector agropecuario sólo representa el 2%.

**Gráfica 130. Escenarios del consumo nacional de energía y Fan Chart: 1965-2100 (Petajoules)**

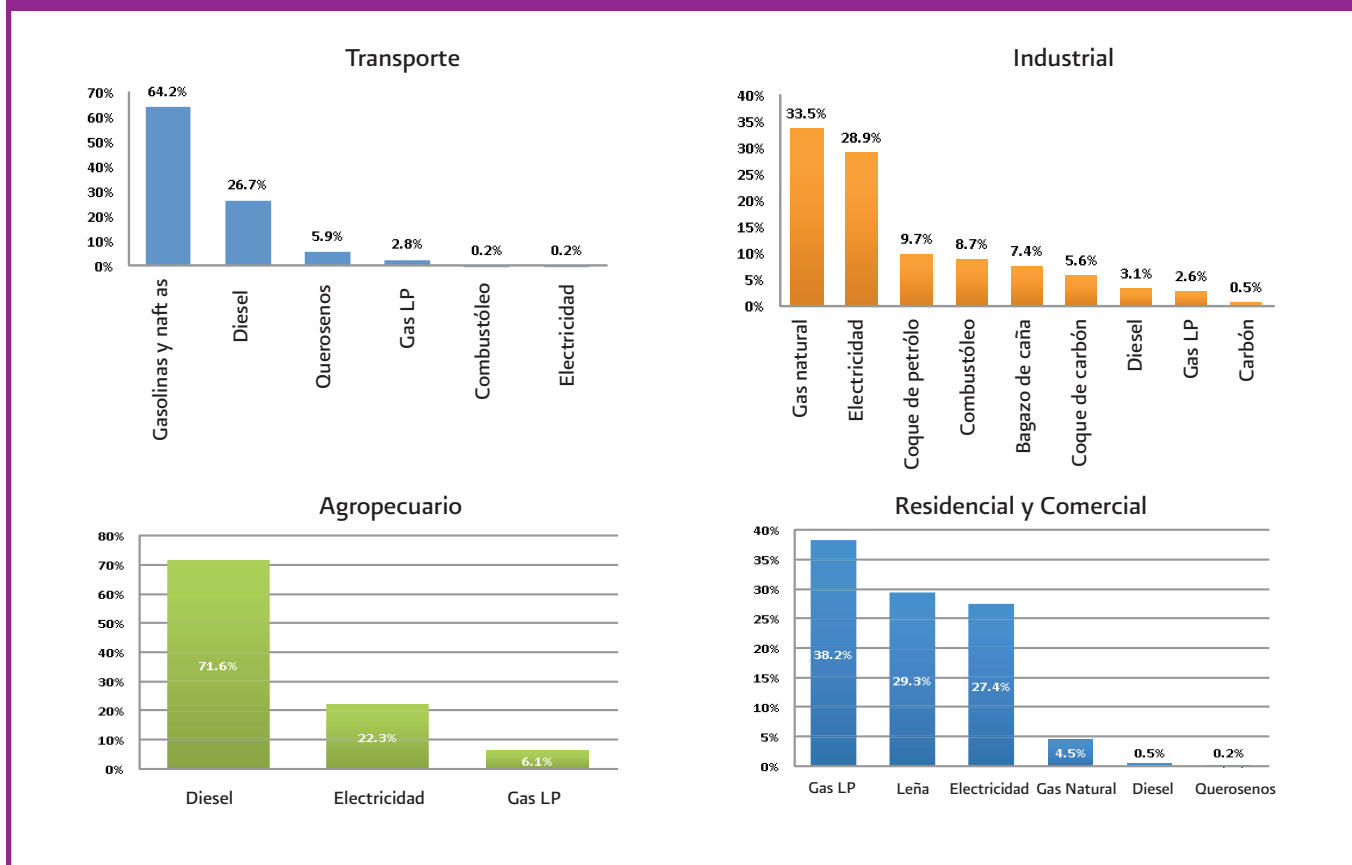


## 5. EL CONSUMO DE COMBUSTIBLES

El consumo de los diferentes tipos de combustibles ha sido un elemento fundamental para el funcionamiento de los diversos sectores, destacando las industrias energéticas, el transporte y la industrial. En este contexto, el consumo de estos energéticos en México ha mostrado un ritmo de crecimiento significativo en los últimos años aunque con distintas intensidades por sectores y por regiones del país (Gráfica 131). Los combustibles del sector transporte son los que más se consumen, debido a que su demanda está basada fundamentalmente en el uso de gasolinas y en una proporción menor el uso de diesel. Por otro lado el consumo de combustibles en el sector industrial también tiene una proporción importante con respecto al consumo nacional, basado principalmente en gas natural y electricidad. En el caso del sector residencial, el consumo de combustibles se concentra exclusivamente gas LP, leña y electricidad. Finalmente los sectores que consumen combustibles en una proporción bastante inferior a lo anteriores son el agropecuario y el comercial, cuyo consumo se concentra en diesel y gas LP, respectivamente.

En este contexto, debido a que los principales sectores consumidores de energía (industrias energéticas, transporte e industrial) utilizan combustibles de origen fósil (gasolina, gas y combustóleo) resulta entonces relevante identificar el posible impacto que tendría la trayectoria de los consumos de energía sectoriales sobre los combustibles. Para ello, se estimaron modelos econométricos de demanda, donde los consumos de los principales combustibles a nivel sectorial, son una función del comportamiento del consumo de energía tanto nacional como de su respectivo sector y de los precios relativos de los combustibles.

**Gráfica 131. Participación porcentual de los combustibles por sectores: 2006**



### SECTORES RESIDENCIAL Y COMERCIAL. GAS LICUADO DE PETRÓLEO (GAS LP)

Los modelos econométricos se estimaron, especificando como variables dependientes al gas LP, tanto del sector residencial ( $GLPR_t$ ) y comercial ( $GLPC_t$ ) que dependen del comportamiento del consumo de energía del sector residencial ( $CER_t$ ) y comercial ( $CEC_t$ ), respectivamente, y de los precios relativos de los combustibles ( $PRCO_t$ ). Se usaron datos anuales de 1965 a 2006. La especificación de los modelos es:

$$(28) \quad glp_{it} = \beta_0 + \beta_1 * ce_{it} + \beta_2 * prco_t + u_t$$

Los vectores de cointegración normalizados para cada sector (Cuadro 108) indican que la elasticidad del consumo de energía, respecto al consumo de gas LP, es muy cercana a la unidad en ambos casos; además la elasticidad de los precios relativos, los coeficientes son negativos con un valor alrededor de -0.5, indicando cierta sensibilidad del gas LP a los precios relativos.

## CUADRO 108. ECUACIONES NORMALIZADAS DEL CONSUMO DE GAS LP EN LOS SECTORES RESIDENCIAL Y COMERCIAL

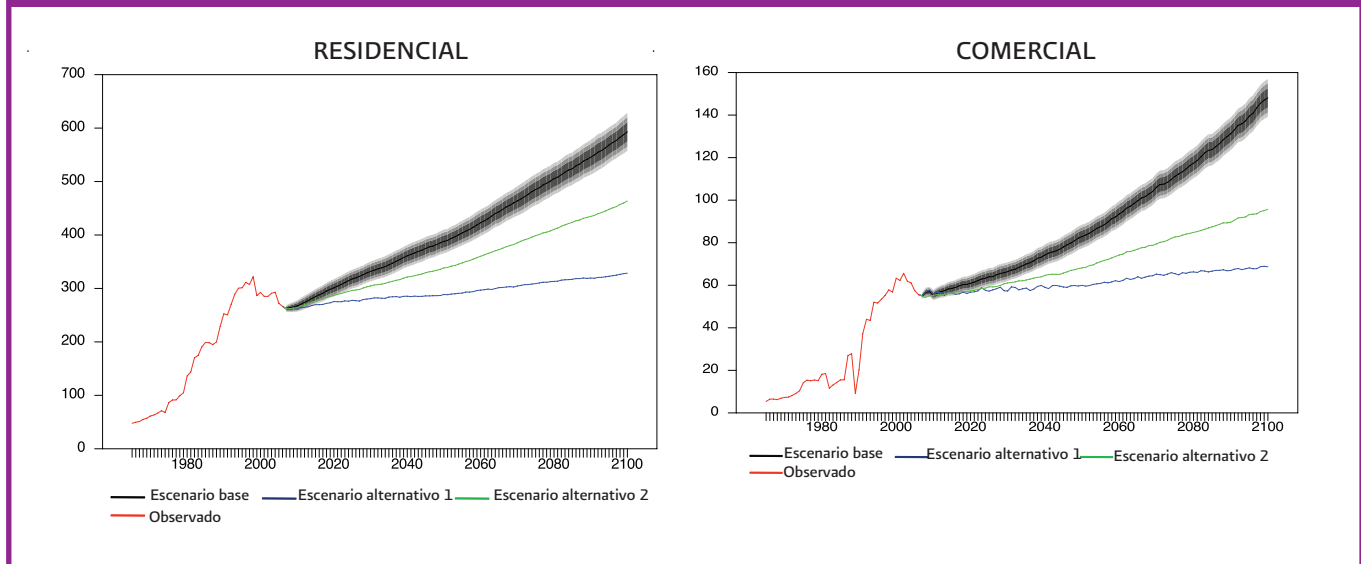
Coefficiente	Residencial	Comercial
$\beta_1$	0.854	0.881
$\beta_2$	-0.467	-0.529

Notas: Las letras en minúsculas representan los valores en logaritmos naturales.  $\beta_1$  representan el coeficiente del consumo de energía para el sector residencial y comercial para cada caso. Periodo: 1968 – 2006.

Con base en los resultados del vector de cointegración se especificaron modelos de corrección de errores (Engle y Granger, 1987), a fin de construir los pronósticos de largo plazo. Los pronósticos, se realizaron tomando como referencia los resultados del consumo de energía en cada sector, generados por los escenarios del apartado 4 (base, escenario 1 y escenario 2). Asimismo, se calcularon en la Gráfica 132 de “Fan Chart” para el consumo de gas LP en los dos sectores, con bandas de probabilidades de 60, 80 y 90%.

Las estimaciones para el sector residencial, muestran que bajo el escenario base, el consumo de gas LP para el sector residencial podría crecer en un rango de 1.8 a 2.9%. Esto implicaría que hacia el 2030 los niveles de consumo de gas Lp se podrían duplicar respecto a los valores observados en 2007. Sin embargo, considerando un desacoplamiento tendencial del uno por ciento anual, el ritmo de crecimiento en el presente siglo sería del orden de 0.7% anual. Así, de cumplirse este escenario hacia el 2017 el consumo de gas Lp se mantendría relativamente constante y significaría aproximadamente el 1.1% del nivel actual de consumo.

Gráfica 132. Escenarios del consumo del gas Lp en el sector residencial, comercial y Fan Chart 1965-2100 (Petajoules)

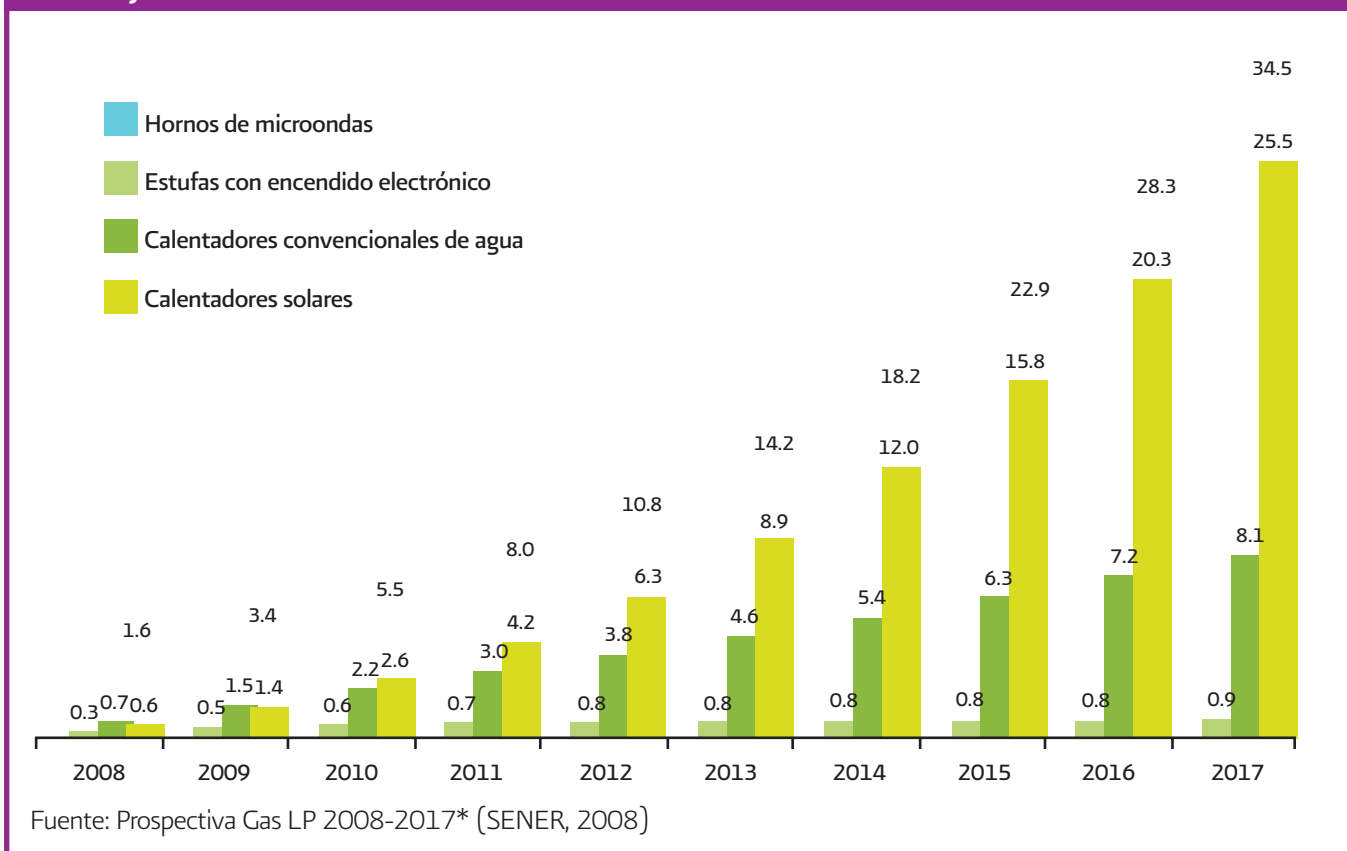


En el caso del sector comercial el crecimiento esperado, en el consumo de gas LP, en el escenario base podría ubicarse entre 1.8 y 2.5% anual para el presente siglo. Sin embargo, el escenario alternativo 2 que asume una disminución en la intensidad energética reporta un crecimiento promedio anual de 1% anual. Es importante señalar que el escenario base, considera que no existen cambios en las condiciones actuales en términos de cambios tecnológicos o de instrumentación de otras medidas orientadas a regular el consumo de este tipo de combustibles.

En este sentido, el documento "Prospectiva Gas LP 2008-2017" (SENER, 2008), señala las perspectivas tecnológicas respecto al consumo de gas LP a nivel de sectores, y donde se observa que los principales resultados muestran que la demanda interna de gas LP para el periodo 2007-2017 considera un decrecimiento medio anual de 0.4%; en donde, el consumo del sector residencial<sup>66</sup> permanecerá estancado y el comercial descenderá a una tasa de 0.6% anual. Este comportamiento<sup>67</sup> se explica principalmente por los siguientes supuestos (Figura 17):

- El sector residencial y comercial muestra una baja en los niveles de demanda a largo plazo por la introducción de los calentadores solares de agua, así como por la mayor eficiencia ante la renovación de estufas y calentadores de agua convencionales. Aunado a lo anterior, continúa avanzando la penetración de gas natural.
- En sector industrial se esperan variaciones en los precios relativos de combustibles sustitutos con relación al gas LP, así como en la tendencia del producto manufacturero, medida de ingreso industrial.
- En el caso particular del sector residencial. Se estima que la demanda de gas LP en este sector permanecerá prácticamente constante. Los cambios desarrollados en el nivel actual de vivienda, el aumento en la tendencia en el ahorro de energía residencial, la introducción de esquemas energéticos alternos -como los paneles solares-, así como cambios en los hábitos de consumo son los principales factores que marcarán este comportamiento en el largo plazo, generando ahorros en los niveles de consumo.

**Figura 17. Ahorro de gas LP en el sector residencial por tipo de equipo, 2008-2017 (miles de barriles diarios)**



<sup>66</sup> El sector residencial es el principal consumidor de este tipo de combustible con una participación de 66%.

<sup>67</sup> Una descripción más detallada de los escenarios energéticos esta en Johson, Alatorre, Romo y Liu (2009) y Molina (2009).

En lo que se refiere al sector comercial se espera que los calentadores solares de agua serán los que generen la mayor parte del ahorro en este sector (6.0 mbd en el año 2017). La continuidad del proceso de sustitución del parque de calentadores de agua convencionales a gas contribuirá con 1.9 mbd. Este proceso de sustitución de equipos convencionales, para el calentamiento de agua tendrá un desarrollo más lento que el de calentadores solares, en virtud de que los equipos convencionales tienen años de uso y su modernización es paulatina.

## CONSUMO DE COMBUSTIBLES EN EL SECTOR INDUSTRIAL

El sector industrial es uno de los más importantes impulsores del crecimiento económico del país debido a que contribuye, de acuerdo con las cifras de INEGI, con cerca del 20% de la producción nacional. Sin embargo, el sector es también uno de los principales demandantes de combustibles de origen fósil. Así, del total del consumo de combustibles, el gas natural es el principal energético con cerca de 34%, seguido de la electricidad<sup>68</sup> con 28%, el coque de petróleo<sup>69</sup> con 10% y el diesel con 3.1% (SENER, 2007). De estos combustibles, el gas natural es el que tiene una mayor relevancia en su desempeño, ya que su tasa de crecimiento promedio anual ha sido de casi 7% desde 1965 hasta 2006.

Nuevamente se estimó la relación de largo plazo de combustibles para el sector industrial como son el gas natural ( $GNI_t$ ), el coque de petróleo ( $COI_t$ ), el diesel ( $DIEI_t$ ) y el gas LP ( $GLPI_t$ ) que dependen cada uno del consumo de energía del sector industrial ( $CEI_t$ ) y de los precios relativos de los combustibles ( $PRCO_t$ ).

$$(29) \quad gni_t = \beta_0 + \beta_1 * cei_t + \beta_2 * prco_t + u_t$$

$$(30) \quad coi_t = \beta_0 + \beta_1 * cei_t + \beta_2 * prco_t + u_t$$

$$(31) \quad diei_t = \beta_0 + \beta_1 * cei_t + \beta_2 * prco_t + u_t$$

$$(32) \quad glpi_t = \beta_0 + \beta_1 * cei_t + \beta_2 * prco_t + u_t$$

Los resultados obtenidos muestran que existen relaciones de cointegración donde los vectores de cointegración, reportan una elasticidad ingreso positiva un poco menor a uno; por su parte, la elasticidades precios son bajas, siempre menores a -0.4 (Cuadro 109). Con base en estos resultados se construyeron los modelos de corrección de error que no rechazan ninguna de las pruebas de especificación.

## CUADRO 109. ECUACIONES NORMALIZADAS DEL CONSUMO DE GAS NATURAL, COQUE, DIESEL Y GAS LP EN EL SECTOR INDUSTRIAL

Coficiente	$gni_t$	$coi_t$	$diei_t$	$glpi_t$
$\beta_0$				3.731
$\beta_1$	0.865	0.547	0.827	0.967
$\beta_2$	-0.413	-0.165	-0.432	-0.194

Notas: Las letras en minúsculas representan los valores en logaritmos naturales. Periodo 1966 – 2006.

Así, el conjunto de resultados obtenidos muestran que (Gráfica 133):

- Las pruebas sobre los modelos econométricos finales, indican que están correctamente especificados. La construcción de los escenarios de crecimiento hasta el 2100, con sus respectivas bandas de probabilidad, indica que el consumo de gas natural, bajo el escenario base muestra, que el crecimiento en el consumo de gas natural en el sector industrial podría ser de 0.9 a 2.0% anual de 2008 a 2100. Al considerar un incremento en los precios

<sup>68</sup> El gas natural está formado por una mezcla gaseosa que se extra junto con el petróleo crudo. Para utilizarlo es necesario separar los líquidos y el azufre que están asociados a este combustible y la electricidad es la energía producida por electrones en movimiento

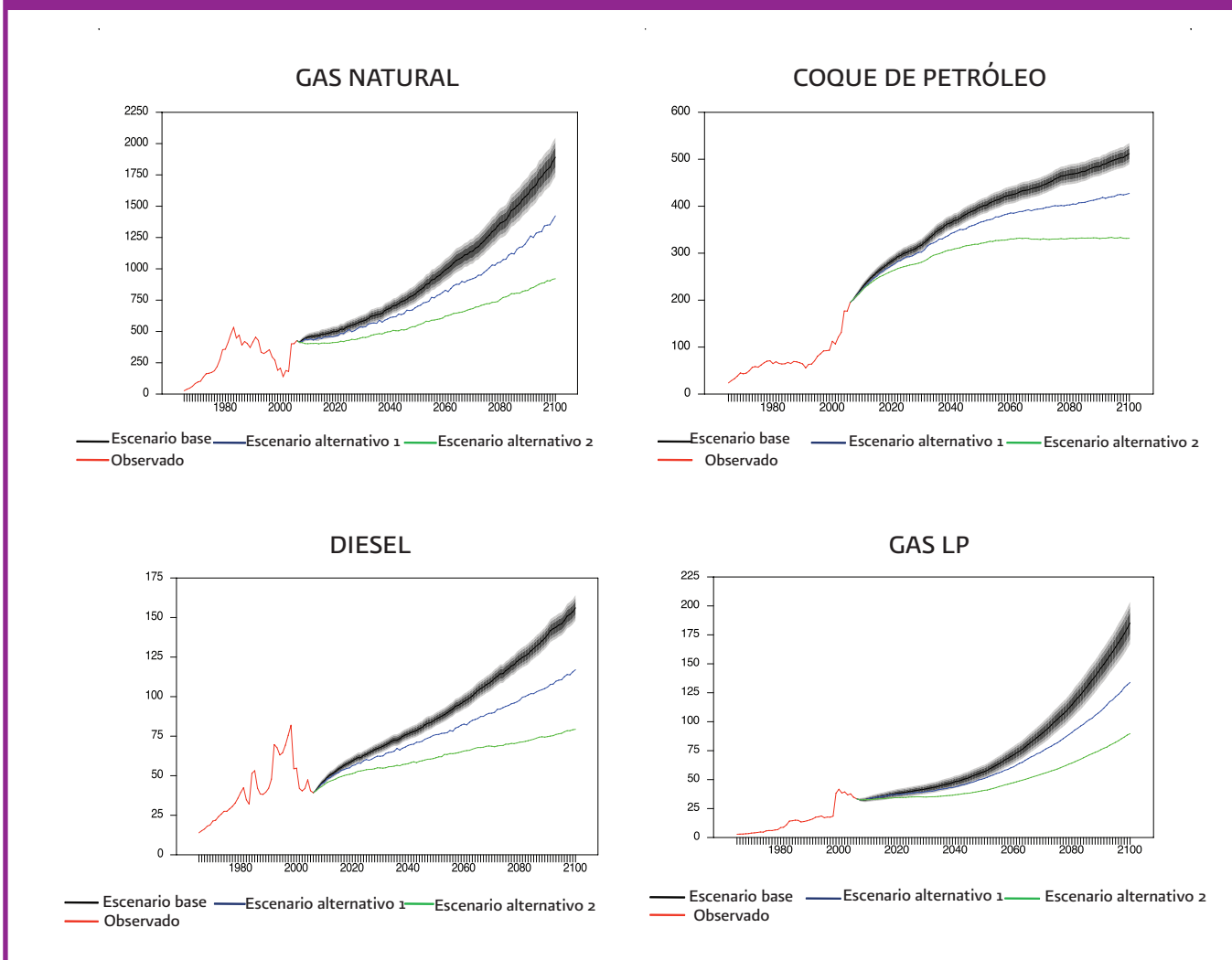
<sup>69</sup> El coque de petróleo se obtiene de la refinación del petróleo. Su forma es sólida y porosa compuesta aproximadamente de 92% de carbono y 8% de ceniza. Existen dos tipos, el coque sin calcinar o verde que contiene residuos muy volátiles y el coque calcinado el cual es poco poroso con alta densidad y resistencia. Ambos son utilizados principalmente en la industria..



de los combustibles, el ritmo de crecimiento sería de 0.7 a 1.3% anual, en tanto que una disminución progresiva en la intensidad energética podría implicar un rango de crecimiento de -0.2 a 1.4% anual.

- En el caso del coque de petróleo, el crecimiento esperado fluctuará entre 0.7 y 1.3% anual; con una política de precios activa se lograría disminuir el ritmo de crecimiento a un nivel de 0.8% anual y con un aumento en la intensidad energética podría ser del orden de 0.6%, para el periodo de 2008 a 2100.
- El diesel, en el escenario base, muestra un comportamiento ascendente para los siguientes años, ya que en promedio el crecimiento sería de 1.1 a 1.8% anual. Sin embargo, la estrategia de incremento en los precios, en este caso, no tendría un impacto significativo toda vez que el ritmo de crecimiento se ubicaría en 1.2% anual y el aumento en la intensidad energética ubicaría su crecimiento en 0.8% .

**Gráfica 133. Consumo del gas natural, coque de petróleo, diesel y gas LP en el sector industrial y Fan Chart: 1965-2100 (Petajoules)**



En el documento Prospectiva Gas LP 2008-2017 (SENER, 2008), se estima que en el periodo de 2008 al 2017 la demanda de gas LP, por parte del sector industrial se mantendrá con un crecimiento del 1.5% anual. Asimismo, se espera un crecimiento en el consumo de coque de petróleo, principalmente por demanda del sector del cemento, aportando al 2017 el 20.9% de la energía en el sector industrial, con un crecimiento promedio de 3.4% anual. El diesel será el combustible industrial con la mayor tasa media de crecimiento con una tasa de 3.5%, convirtiéndose en el tercer combustible de mayor preferencia (SENER, 2008).

Esta situación se explica debido a que:

- Algunas empresas están sustituyendo en sus procesos productivos, combustóleo, leña y gas LP por gas natural, carbón, coque de petróleo y en menor medida diesel.
- El comportamiento del precio del combustóleo afectará su demanda futura, por lo que se prevé una mayor tendencia a ser sustituido por gas natural y otros productos.
- De acuerdo a la intensidad en el consumo de gas natural, la rama de las industrias básicas de metales se ubicará como una industria de alta demanda energética

### CONSUMO DE COMBUSTIBLES EN EL SECTOR TRANSPORTE

El consumo de energía en el sector transporte está compuesto por un 64% de gasolinas y un 27% por diesel. Las estimaciones muestran que el consumo de gasolinas, en el escenario base, seguirá con su tendencia ascendente en los próximos años, en un rango de 3.0 a 4.1% en promedio anual para el periodo 2008 al 2100.

De esta manera se estimaron modelos econométricos para cada uno de los combustibles utilizados en el sector transporte. La especificación, es similar a la de los otros sectores, en el sentido de que la demanda de combustible, es una función (gasolinas y el diesel), del nivel de energía del sector y los precios relativos de los combustibles.

$$(33) \quad gt_t = \beta_0 + \beta_1 * cet_t + \beta_2 * prco_t + u_t$$

$$(34) \quad diet_t = \beta_0 + \beta_1 * cet_t + \beta_2 * prco_t + u_t$$

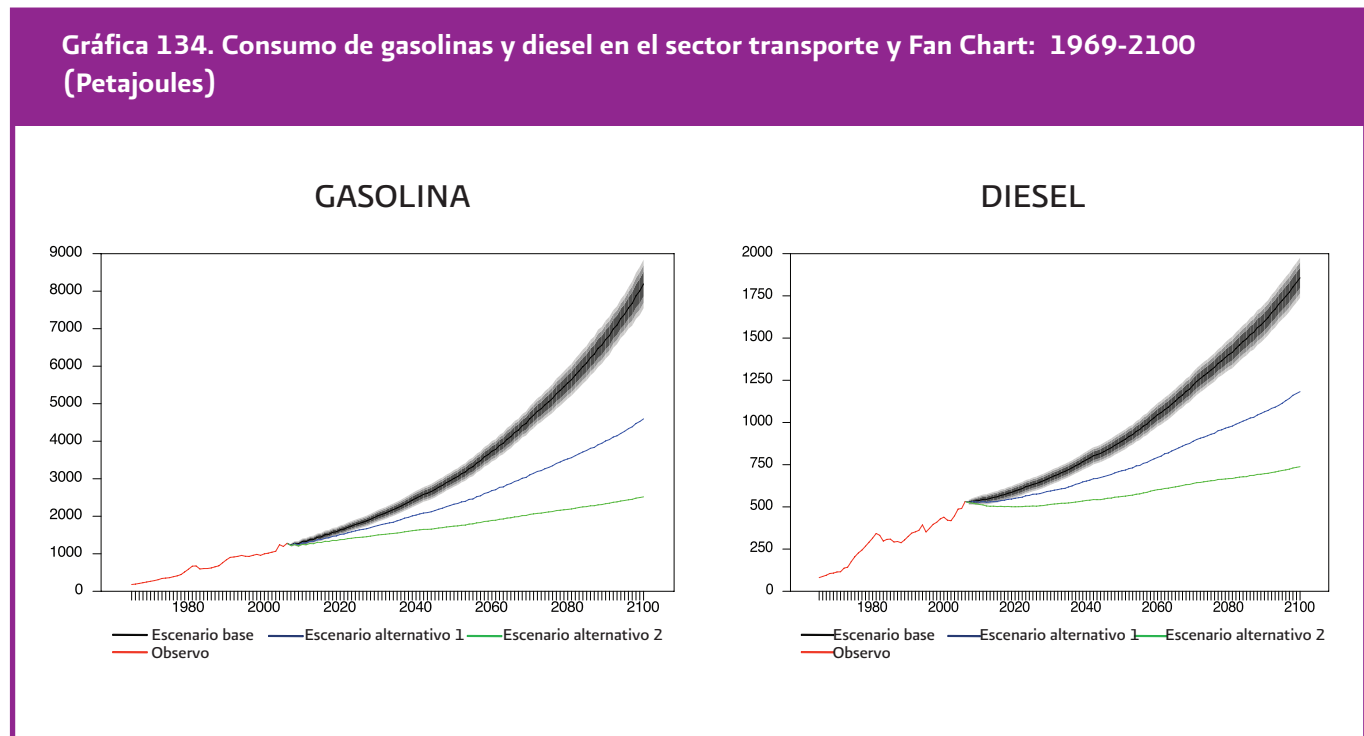
Los resultados de la estimación de los vectores de cointegración se reportan en el Cuadro 110. Se puede observar que la elasticidad del consumo de gasolina respecto a los niveles de energía es muy alta con un valor de 0.85 y en el caso del diesel de 0.628. En contraste, los precios relativos de los combustibles, ambas elasticidades se comportan de manera similar ya que registran un valor cercano a -0.24.

### CUADRO 110. ECUACIONES NORMALIZADAS DEL CONSUMO DE GASOLINA Y DIESEL EN EL SECTOR TRANSPORTE

Coefficiente	$gt_t$	$diet_t$
$\beta_0$	0.598	1.267
$\beta_1$	0.853	0.628
$\beta_2$	-0.227	-0.267

Notas: Las letras en minúsculas representan los valores en logaritmos naturales.  $\beta_1$  representan el coeficiente del consumo de energía para el sector residencial y comercial para cada caso. Periodo 1968–2006.

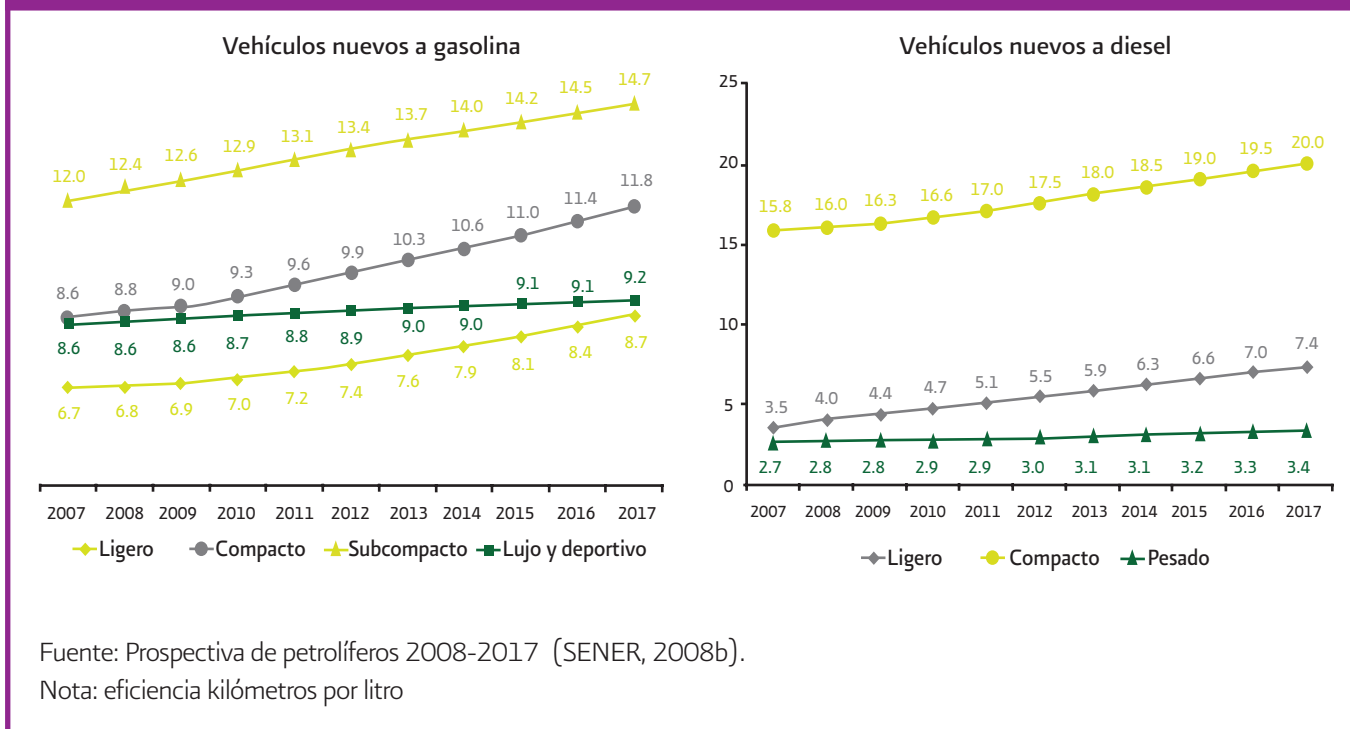
Con base en la estimación de las ecuaciones y los modelos de corrección de errores (Engle y Granger, 1987), se realizaron los pronósticos hasta el año 2100 utilizando los escenarios base, alternativo 1 y alternativo 2 ya definidos en el apartado anterior (Gráfica 134).



En el caso del consumo de diesel, en el escenario base, se estima un crecimiento de 2.0 a 3.2% anual para el periodo de 2008 a 2100; con un aumento de los precios relativos el consumo de este tipo de combustible se ubicaría entre 1.7% anual, pero en el contexto del escenario alternativo 2, se espera un aumento del orden de 0.9%, considerando una trayectoria de desacoplamiento del sector transporte del uno por ciento anual. En el documento “Prospectiva de petrolíferos 2008-2017” (SENER, 2008), se menciona que durante el período 2007-2017, se estima que el parque vehicular crecerá a una tasa de 5.3%, es decir, un incremento de 14 millones de automóviles. Se espera entonces que el consumo de gasolinas se incremente en 2.6% anual entre 2008 a 2017. Esta dinámica de crecimiento considera entonces un aumento en la eficiencia del parque vehicular que permitirá reducir los niveles de consumo de la gasolina (Figura 18).

En el caso del consumo de diesel, para el sector transporte, se observa una dinámica de crecimiento a una tasa promedio anual de 2.7%. Por otra parte, se concluye que la gasolina continuará siendo el combustible de mayor demanda durante los próximos diez años, aunque existe un gran interés por parte de algunas armadoras de vehículos en comercializar automóviles alimentados por diesel. Así, la competitividad observada en los precios del diesel, así como las ventajas que ofrecen estos automotores y su mayor eficiencia mecánica respecto a los motores de gasolina son aspectos que pueden ocasionar un incremento en el parque vehicular de automotores a diesel, incidiendo en un aumento en el consumo de este combustible.

**Figura 18. Eficiencia promedio de vehículos nuevos a gasolina y a diesel por categoría 2007-2017**



De este modo, en general se espera un aumento en el consumo de energía, en particular, en el sector industrial y el transporte y de generación de energía. Asimismo, se espera, que en el mediano plazo, las innovaciones tecnológicas y el aumento en la eficiencia en los procesos productivos acompañado de una nueva estructura de precios relativos sean factores importantes que moderen el consumo de energía y en consecuencia permitan reducir los requerimientos de combustibles de origen fósil.

### La demanda nacional de gasolinas<sup>70</sup>

El sector transporte es una de las actividades fundamentales en el funcionamiento de las actividades económicas de los países. Sin embargo, tiene consecuencias importantes en la salud de los habitantes, incrementa los costos ambientales y ocasiona costos colaterales importantes (Galindo *et al.*, 2006, Newbery, 1988 y 1990 y Jones y Manuelli, 1990). En este sentido, resulta relevante identificar los determinantes de la demanda de gasolina, así como los escenarios prospectivos que permitan evaluar distintas medidas de control sobre el consumo de gasolina.

La demanda de gasolinas es una demanda derivada (Sonensson, 2001 y Sterner y Dahl, 1992) de las necesidades de transporte de la población, relacionada a sus necesidades de tiempo, *status*, o placer. En este contexto, los agentes económicos, dependiendo de su restricción presupuestal y de sus necesidades de transporte, deciden, en etapas separadas, sus modos de transporte. En este sentido, la demanda de gasolinas se decide en etapas (Berkowitz, Gallini, Miller y Wolfe, 1990). En consecuencia, la demanda de gasolinas puede caracterizarse como la demanda de cualquier otro bien o servicio y en general se modela en forma similar a las demandas de energía (Howarth, *et al.*, 1993, Jorgenson y Wilcoxon, 1993, Christodoulakis *et al.*, 2000, Engsted y Bentzen, 1993 y Galindo, 2005, Sterner, 1989, Stern, 2000, Pindyck, 1979). Por lo tanto, la demanda de gasolina nacional ( $CG_t$ ) esta en función del ingreso ( $Y_t$ ), de los precios relativos de las gasolinas ( $PRG_t$ ), los precios relativos de los automóviles ( $PRA_t$ ) y del rendimiento kilómetros por litro ( $KMLT_t$ ).

$$gn_t = \beta_1 * y_t - \beta_2 * prg_t - \beta_3 * pra_t - \beta_4 * kmlt_t + u_t$$

Los resultados con el procedimiento de Johansen (1988, 1992 y 1995) (Cuadro R1) indican que existe una relación estable de largo plazo entre el consumo de gasolinas a nivel nacional, el ingreso, los precios relativos de la gasolina, los precios relativos de los automóviles y la tendencia de los rendimientos.

#### CUADRO R1. ESTADÍSTICOS DEL PROCEDIMIENTO DE JOHANSEN

$H_0$	Prueba de la Traza	Valores Críticos (5%)	Prueba de la Raíz Característica Máxima	Valores Críticos (5%)
$r = 0$	85.35*	68.5	42.38*	33.5
$r \leq 1$	22.06	29.7	17.34	21.0
$r \leq 3$	4.719	15.4	4.717	14.1
$r \leq 4$	0.001	3.8	0.001	3.8

Notas: (\*) Indica rechazo de la hipótesis nula. La hipótesis nula es aceptada cuando el valor calculado del estadístico de la Traza y de la Raíz Característica Máxima es menor al valor crítico. Número de rezagos en el VAR = 3. El modelo VAR incluye las variables sin restringir: constante y *d81* (*dummy* de pulso en 1981). *Periodo*: 1965 - 2007.

$$gas_t = 1.13y_t - 0.14 prg_t - 0.15 pra_t - 0.16 ren_t$$

En el caso de la tendencia en los rendimientos se registra una elasticidad negativa, indicando que un aumento en los rendimientos genera una disminución en el consumo de gasolina. Así, por ejemplo, un aumento de 10 por ciento en los rendimientos promedio podría generar una disminución de 1.6 por ciento en el consumo de gasolina, asumiendo que las demás variables no se modifican. Debe mencionarse que no existen muchos trabajos sobre la elasticidad de los rendimientos aunque Graham y Glaister (2002) reportan una relación negativa entre el consumo de gasolina y la eficiencia en el consumo de combustibles. Brons *et al.* (2006) utiliza los resultados de distintas investigaciones empíricas y encuentra que la elasticidad de la gasolina a la eficiencia en el uso del combustibles se puede ubicar en un valor de -0.29 a -0.24. También se pueden citar los trabajos de Harrington (1997), que muestra un impacto de la eficiencia en el consumo de gasolinas en la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> resultados similares se muestran en Khazzoom (1995), Johansson y Schipper (1997) y Rouwendal (1996).

<sup>70</sup> Este apartado se basa en Galindo (2008), El Análisis de Costo-Beneficio de Aumento de la Eficiencia Vehicular y Biocombustibles, Instituto Nacional de Ecología (INE).

No obstante, los resultados deben ser tomados con precaución, toda vez que la serie de rendimientos es una proyección. Con base en los resultados de la ecuación de cointegración se estimó un modelo de corrección de errores (Engle y Granger, 1987) con el propósito de modelar las variaciones de corto plazo del consumo de gasolina. La ecuación del modelo de corrección de errores muestra que las pruebas de diagnóstico sobre los errores no siguen un patrón sistemático, toda vez que rechazan la presencia de autocorrelación, heteroscedasticidad y se distribuyen como una función normal. Ello indica que el modelo contiene toda la información sistemática relevante al fenómeno dado el conjunto de información disponible. Así, el modelo reproduce adecuadamente la evolución de los datos (Gráfica R1). Ello permite que los resultados se puedan utilizar para realizar pronósticos bajo distintos escenarios en las variables exógenas. Es importante destacar que el periodo de estimación del modelo de corto plazo, corresponde a los años de 1980 a 2007, toda vez que las variaciones en los rendimientos en los años anteriores se realizaron asumiendo una tasa constante lo que puede afectar los resultados del modelo sobreestimando el impacto a corto plazo.

$$\begin{aligned} \Delta gas_t = & -2.020 + 0.441*\Delta gas_{t-1} + 0.399*\Delta y_t - 0.184*\Delta y_{t-2} - 0.048*\Delta prg_t \\ & (-3.115) \quad (6.101) \quad (3.435) \quad (-1.784) \quad (-2.715) \\ & -0.135*\Delta pra_t - 0.849*\Delta kmlt_t + 0.565*\Delta kmlt_{t-4} - 0.155*ecm_{t-1} \\ & (-2.395) \quad (-3.083) \quad (2.246) \quad (-3.133) \\ & -0.041*d82 - 0.039*d99 \\ & (-2.159) \quad (-2.249) \end{aligned}$$

*Pruebas de diagnóstico:*

R<sup>2</sup>: 0.941

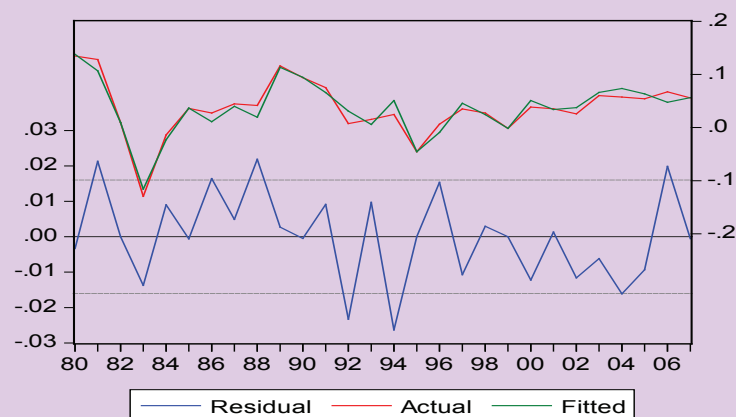
Normalidad J-B: 0.346 [0.841]

Autocorrelación LM (2 rezagos): F: 0.718 [0.504]

Heteroscedasticidad ARCH (2 rezagos): F: 3.163 [0.062]

Error Cuadrático Medio: 0.013

**GRÁFICA R1 VALORES ACTUALES, ESTIMADOS Y RESIDUALES DE LA DEMANDA NACIONAL DE GASOLINAS**



## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. La energía se ha convertido en un elemento fundamental para el crecimiento y desarrollo de las economías industrializadas. La evolución del consumo de energía muestra una trayectoria ascendente que sigue con un cierto rezago los cambios en la trayectoria del producto. En este sentido, existe una fuerte asociación entre los niveles de producción, energía y por consiguiente con el nivel de empleo, a través de su relación con el producto. Así como de estas variables con los niveles de emisión de los GEI.

2. El consumo *per cápita* de energía, después de un acelerado crecimiento durante el periodo de 1965 a 1980, se ha mantenido relativamente estable, con una ligera recuperación a partir de 1995. De hecho, entre el periodo de 2000 a 2006, muestra una tasa de crecimiento media anual del orden de 1.1%, pasando de un nivel de 69,800 millones de joules por habitante en 2000 a 75,277 millones joules en 2006.
3. Este nivel de consumo indica que cada habitante ha demandado en el último año, aproximadamente 20 mega watts, lo equivale a tener encendido un poco más de 500 focos de 100 watts todo el año, y este nivel de energía, con la tecnología actual, requiere el consumo de 1,750 litros de petróleo al año. Ello sugiere que la economía mexicana se ha hecho más intensiva desde el punto de vista energético en términos *per cápita*. De hecho una recuperación de la economía junto con una disminución en el crecimiento de la población inducirían un aumento en la demanda de energía y en consecuencia se incrementará el consumo por habitante.
4. La intensidad energética, medida como energía a producto, en el periodo de 1995 a 2007 muestra una disminución con relación a los niveles registrados durante la década de los ochenta. Este comportamiento está asociado a la evolución de los precios relativos de los combustibles, a cambios en la composición del producto y al proceso de innovación tecnológica.
5. Los modelos de consumo de energía tanto nacional como por sectores se pueden especificar como una función de demanda tradicional que depende de los cambios en el ingreso y en los precios del bien a analizar. Los resultados obtenidos de esas ecuaciones señalan que las elasticidades ingreso son positivas y en promedio reportan valores cercanos a la unidad; en cambio los precios relativos de la energía reportan un impacto negativo aunque con una magnitud es baja. De esta manera, una recuperación de la economía induciría un crecimiento de la energía no obstante el aumento marginal de precios.
6. Bajo el escenario base, es decir con un crecimiento de la economía de 3.5% anual y precios relativos e intensidades energéticas constantes, entonces de acuerdo a las elasticidades estimadas, el consumo de energía a nivel nacional crecería 2.4% anual. El consumo en las industrias energéticas 1.6%, en el sector agropecuario 1%, en el industrial 1.1%, en el residencial en 1.2%, en el comercial en 1.5% y en el transporte mostraría un mayor nivel de crecimiento con una tasa de 2.4%.
7. Considerando un aumento en el nivel de precios relativos de 3% anual, así como una disminución en la intensidad energética del 1% se observa que, en general se obtienen disminuciones en los niveles de consumo en todos los sectores. Ello indica la importancia de instrumentar políticas que combinen tanto aumento de precios como regulaciones que contribuyan al proceso de desacoplamiento energético. En particular, el sector transporte es el que muestra una mayor disminución en su consumo de energía ante los cambios en los precios y cambio en la intensidad.
8. El consumo de gasolina confirma que es importante combinar políticas de precios y de regulación. Esto es, una estrategia de aumento de precios de la gasolina y de los bienes colaterales al uso del auto y de mayor eficiencia vehicular puede contribuir a controlar el ritmo de crecimiento del consumo de gasolina.

## RECOMENDACIONES

- a. Es indispensable instrumentar una estrategia para reducir el ritmo de crecimiento de la demanda de energía en México y modificar la matriz energética hacia combustibles más limpios.
- b. Es necesario instrumentar una estrategia para reducir el ritmo de crecimiento del consumo de combustibles en el sector transporte. Ello debe incluir una política de precios más agresiva, regulaciones más estrictas y el fomento a la innovación tecnológica en el sector. Todo ello apoyado por la construcción de una red de transporte público eficiente.
- c. Resulta fundamental construir una matriz de oferta energética limpia. Ello se traduce en incrementar la oferta energética con base en energías renovables. Sin embargo, las proyecciones realizadas (Johston, Alatorre, Romo y Liu, 2009 y Molina, 2009) sugieren que es posible que la economía mexicana transite en la dirección contraria



## 4.2 ESTRATEGIAS DE MITIGACIÓN PARA MÉXICO

### Puntos fundamentales

Las concentraciones de GEI en la atmósfera son, actualmente, aproximadamente de 430 ppm de CO<sub>2</sub>e y se incrementan en un poco más de 2 ppm cada año. Ello contrasta con un nivel de 290 ppm de CO<sub>2</sub>e previo a la Revolución Industrial. Los impactos de estos niveles de concentraciones en la atmósfera son significativos y se traducen, entre otras cosas, en un aumento de 0.7 grados de temperatura con respecto a la Revolución Industrial y se espera que estos niveles de emisiones se asocie a un aumento de entre 2 y 5 grados centígrados de temperatura (Stern, 2007) aunque lo más probable sea un aumento de entre 2 y 3 grados de temperatura.

El cambio climático es el resultado de una gran externalidad negativa y debe por tanto resolverse a través de un acuerdo internacional basado en el precepto de una responsabilidad compartida pero diferenciada. Sin embargo, a la fecha no existe este acuerdo internacional vigente, aunque existe una abundante evidencia científica sobre las opciones disponibles. Así, las principales trayectorias de estabilización para este siglo indican que buscar estabilizar a 450 ppm de CO<sub>2</sub>e es deseable ya que elimina los efectos potenciales climáticos más extremos, pero requiere de intensos procesos de descarbonización y de desacoplamiento energético. Ello implica además reconocer que tendrá costos económicos importantes pero que permiten a la economía mexicana transitar a una senda de desarrollo sustentable.

No obstante ello, el retraso de una acción colectiva inmediata y a que los impactos climáticos asociados a un aumento de 2 grados de temperatura son ya prácticamente inevitables, sugieren que es posible que se busquen acuerdos internacionales con metas de estabilización de entre 500 y 550 ppm; sin embargo debe reconocerse que 550 ppm presenta riesgos climáticos inherentes. Debe además considerarse que las formas de mitigación son muy sensibles al nivel máximo y a su punto de corte, por lo que retrasar un proceso de mitigación colectiva para después del 2020 o 2030 que tenga como objetivo estabilizar las emisiones a 550 ppm o menos, supone duplicar las tasas de mitigación requeridas (Stern, 2007). Ello, desde luego, tiene consecuencias económicas significativas y, en el extremo hace impráctica una meta de este nivel atendiendo a sus costos económicos. Por ello posponer cualquier acuerdo internacional tiene costos económicos importantes que reducen su viabilidad.

México puede jugar un papel relevante en el acuerdo internacional atendiendo a su condición de país no perteneciente al anexo 1. Ello puede contribuir a minimizar sus costos y a maximizar los beneficios económicos de iniciar el proceso de descarbonización en etapas tempranas y obtener financiamientos adicionales y acceso a las tecnologías disponibles. Las condiciones de mitigación necesarias para cumplir con algunas de las trayectorias consideradas son factibles para México atendiendo a la evolución histórica reciente. No obstante, es necesaria una estrategia activa al respecto donde se incluyan, una buena señal de precios, regulaciones adecuadas y un fomento a la innovación y la difusión tecnológica. Esta estrategia debe de contener metas específicas por sectores y para el conjunto de la economía.

Los costos totales estimados por reducir las emisiones en un 50% al 2100 respecto a las emisiones del 2002, de acuerdo al PIB actual se ubican entre 0.70 y 2.21% aplicando entre 10 y 30 dólares de costo de la tonelada de carbono y con tasa de descuento del 4%. Ello indica que los costos de los impactos del cambio climático son superiores a los costos de mitigación. Destaca además que estos costos son diferentes por sectores y que pueden disminuirse substancialmente atendiendo a la aplicación de una estrategia óptima de mitigación y aprovechando las opciones de intercambio internacional. Las estimaciones realizadas por el Centro Mario Molina, por el Banco Mundial (Johnston, et al., (2009) y por Quadri (2008) sugieren que es factible, de acuerdo a la disponibilidad de tecnologías y de sus costos transitar a una economía baja en carbono. Debe sin embargo reconocerse que persiste un importante nivel de incertidumbre en las estimaciones de estos costos.

## 1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático representa en la actualidad uno de los mayores retos de la humanidad. La magnitud de los impactos esperados y los procesos de adaptación y mitigación en curso asociados al cambio climático modificarán las condiciones económicas, sociales y, en general, de vida de la mayoría de los mexicanos y redefinirán las relaciones de México con el entorno internacional. Las características del cambio climático, como una externalidad negativa mundial, hacen indispensable una acción colectiva basada en un acuerdo internacional con responsabilidades compartidas pero diferenciadas. Así, los costos económicos estimados, a nivel global, del cambio climático sugieren (Stern, 2007) que resulta fundamental una acción ordenada y con mayor intensidad para apoyar los procesos de mitigación y adaptación al cambio climático. En este sentido, México adquiere ventajas económicas y contribuye a minimizar los impactos negativos al encauzar esfuerzos a los procesos de mitigación en el contexto de un acuerdo internacional.

Las relaciones entre las causas que originan las emisiones, sus consecuencias climáticas y sus posteriores impactos económicos y los procesos de retroalimentación respectivos conllevan a la construcción de escenarios que dependen de diversos parámetros y variables. Asimismo, debe considerarse que el cambio climático es un fenómeno global, con causas y consecuencias asimétricas por países y regiones, donde las posibles trayectorias dependen de la evolución de la economía mundial y, en este contexto, de algún tipo de acuerdo internacional al respecto, lo que sin duda aumenta aún más el nivel de incertidumbre. No obstante ello, es posible identificar patrones sistemáticos en los procesos de mitigación que ofrecen, a un nivel agregado, las posibles opciones en las trayectorias de mitigación para México ante diferentes direcciones a nivel mundial.

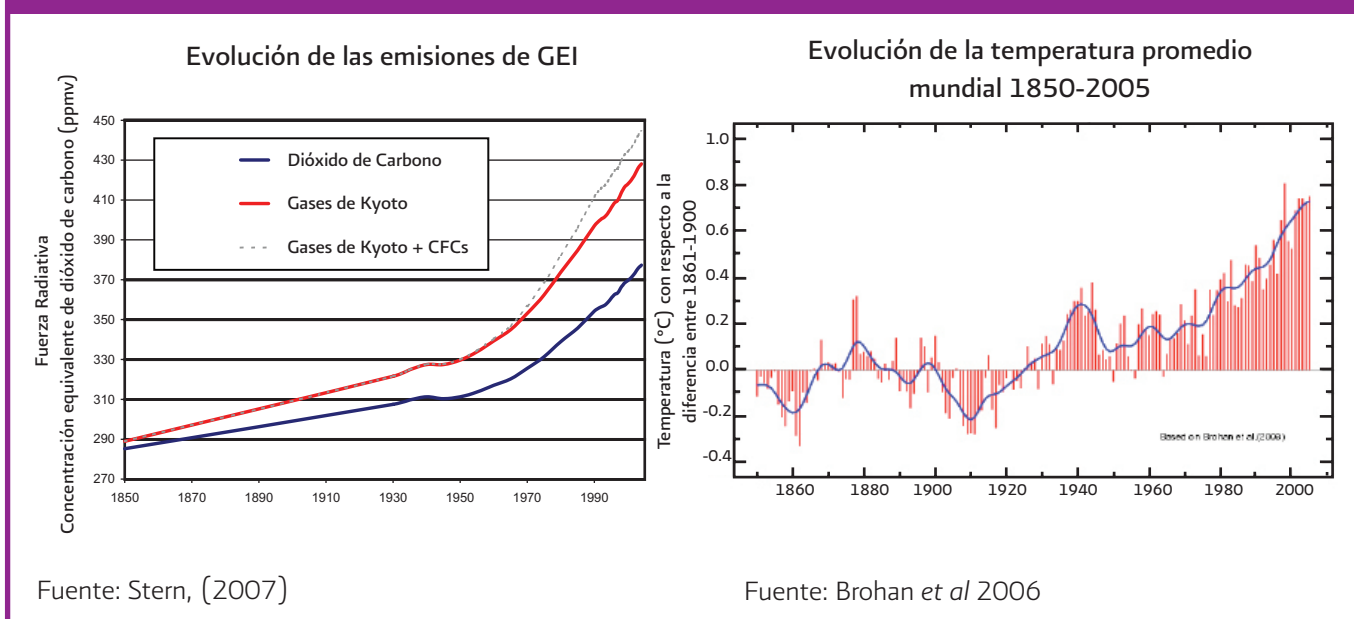
## 2. EL CONTEXTO INTERNACIONAL

Actualmente se estima (IPCC, 2007) que las emisiones de GEI son el equivalente a 430 ppm (partes por millón) de bióxido de carbono equivalente ( $\text{CO}_2$ e  $\text{CO}_2$  equivalente)<sup>71</sup> y se espera que aumenten en 2.3 ppm cada año<sup>72</sup>. De este modo, se proyecta que se pase de un nivel de concentraciones de 290 ppm de  $\text{CO}_2$ e previo a la revolución industrial a niveles de entre 550 y 700 ppm en el 2050 y de entre 650 y 1,200 ppm para el 2100 (IPCC, 2007). Esto es, un aumento de 2.5 ppm por año durante 45 años implica un crecimiento de 112.5 que sumado a los niveles actuales implica concentraciones de 542.5 ppm para el 2050 (Stern, 2007). Estos niveles de emisiones se asocian a un aumento de entre 2 y 5 °C de temperatura (Stern, 2007), aunque lo más probable sea un aumento de entre 2 y 3 grados de temperatura (Gráfica 135).

<sup>71</sup> Se estimaba antes de la Revolución Industrial un nivel de 280 ppm (partes por millón).

<sup>72</sup> Se incluyen en el CO<sub>2</sub>e los seis gases incluidos en el protocolo de Kioto (SEMARNAT-INE, 2001)

Gráfica 135. Evolución de las emisiones y de la temperatura



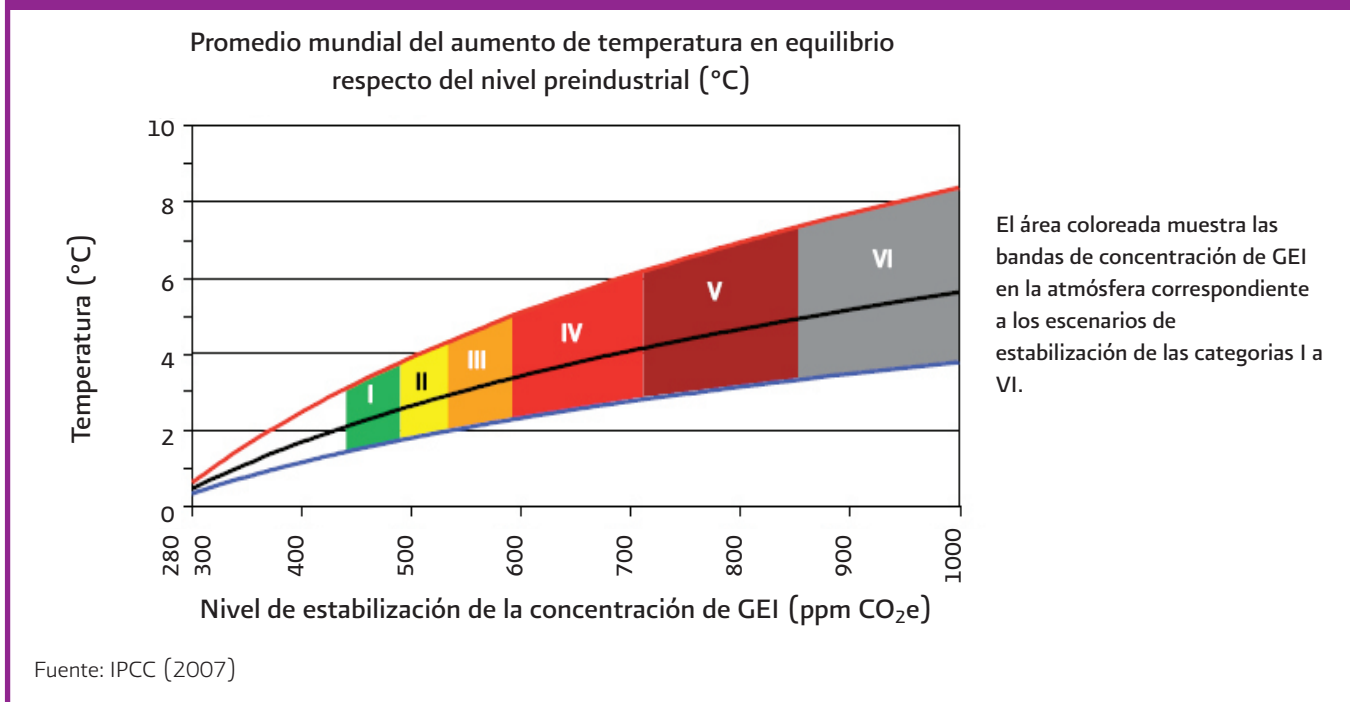
Así, una estabilización de las emisiones en 42 Gt CO<sub>2</sub>e se traduciría en un aumento de las concentraciones al final del siglo de 650 ppm que implica muy probablemente un aumento de 3 grados de temperatura en referencia a la Revolución Industrial y de 2 grados aproximados con respecto al nivel actual. De hecho, se estima que por cada 15 a 20 Gt CO<sub>2</sub> de emisiones adicionales, se traduzca en un incremento adicional en las concentraciones de 1 ppm (Stern, 2007) y, se estima que las emisiones de GEI aumentaron en 70% entre 1970 y 2004 con un incremento de las emisiones asociadas a energía de 145%, en transporte del 120%, en industria del 65%, en uso de suelo en 40%, y en emisiones indirectas en la agricultura en 27% (IPCC, 2007). Asimismo, se estima un incremento de las emisiones de entre 37 y 50% entre 2000 y 2050 (OCDE, 2004).

En este contexto, se proyecta un aumento de las emisiones de alrededor de entre 1 y 2% anual entre 2004-2030 (Stern, 2007). Estas proyecciones muestran que el ritmo de crecimiento de las emisiones será superior al ritmo de crecimiento de la población lo que sugiere que las emisiones tienen otros factores explicativos además de la evolución de la población y que en todo caso aumentarán las emisiones *per cápita*.

La evidencia científica (IPCC, 2007) muestra entonces la presencia de una clara causalidad entre niveles de emisiones y temperatura, aunque con un importante nivel de incertidumbre sobre los valores específicos como se observa en la Gráfica 136. Las estrategias de mitigación deben considerar entonces rangos de valores junto con su probabilidad de ocurrencia (IPCC 2007), y que existen incluso impactos diferenciados de los distintos tipos de GEI. En todo caso, resulta relevante reconocer siempre la presencia de un nivel de incertidumbre importante en las proyecciones y escenarios alternativos.

Las estrategias de mitigación incluyen entonces una combinación de objetivos en emisiones asociados a rangos de temperaturas y a trayectorias en el tiempo (Cuadro 111 y Gráfica 136). Esto es, la selección del momento en el tiempo que se decide mitigar determina en buena medida la trayectoria e intensidad del proceso de mitigación requerido para alcanzar la meta seleccionada. De este modo, existen diversas trayectorias de mitigación, dependiendo tanto del nivel de emisiones a alcanzar como del momento en el tiempo que se inicia el proceso de mitigación. Retrasar el proceso de estabilización implica aumentar las tasas de mitigación futuras y, desde luego, aumenta los costos y los riesgos de manera significativa.

**Gráfica 136. Relación entre temperatura y emisiones de GEI**



## CUADRO 111. PROYECCIÓN DE TEMPERATURAS

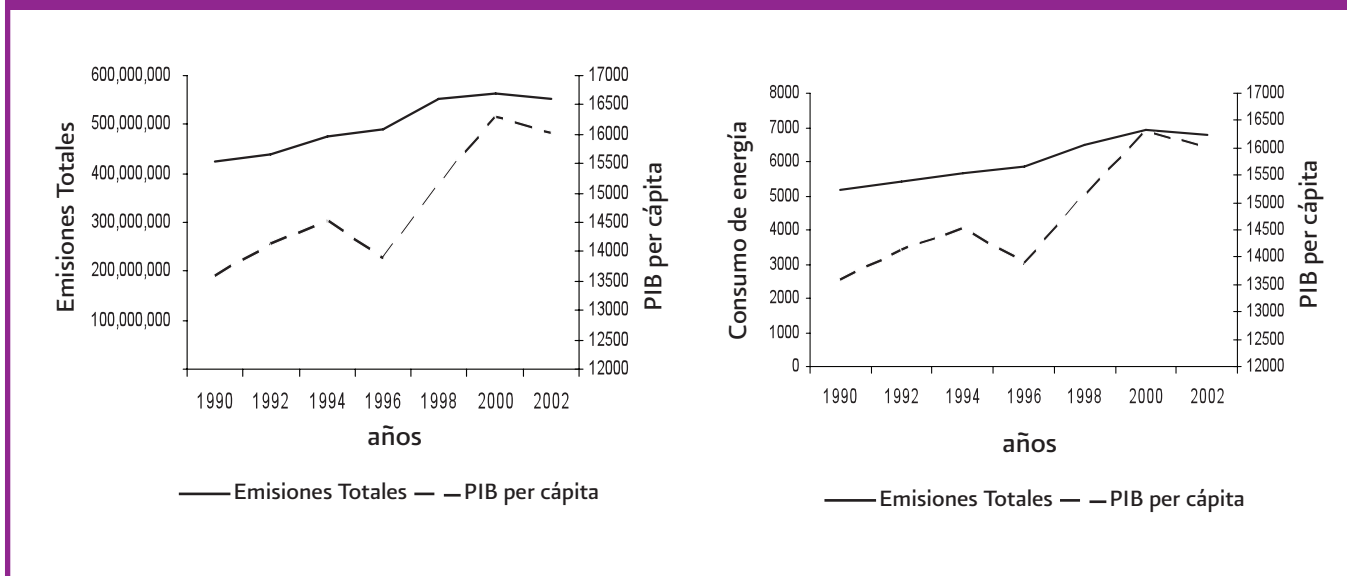
Nivel de estabilización (ppm CO <sub>2</sub> equivalente)	Incremento de Temperatura al Equilibrio Relativo		
	IPCC TAR 2001 (Wigley y Raper)	Hadley Centre Ensemble	Once estudios
400	0.8 – 2.4	1.3 – 2.8	0.6 – 4.9
450	1.0 – 3.1	1.7 – 3.7	0.8 – 4.9
500	1.3 – 3.8	2.0 – 4.5	1.0 – 7.9
550	1.5 – 4.4	2.4 – 5.3	1.2 – 9.1
650	1.8 – 5.5	2.9 – 6.6	1.5 – 11.4
750	2.2 – 6.4	3.4 – 7.7	1.7 – 13.3
1000	2.8 – 8.3	4.4 – 9.9	2.2 – 17.1

Fuente: Stern (2007)

Las características específicas del fenómeno del cambio climático y su evolución actual plantean la necesidad de establecer un acuerdo internacional de mitigación, e indican que existen ciertas condiciones sobre las posibles trayectorias de estabilización que resulta relevante considerar para definir la estrategia de mitigación mexicana:

1. La evidencia disponible muestra que existe una estrecha asociación entre niveles de emisiones de GEI y el nivel de ingreso per cápita (Gráfica 137) (Stern, 2007). De este modo, es posible esperar que un mayor crecimiento económico y poblacional se traduzca en un mayor nivel de emisiones de acuerdo a la evidencia histórica. En este sentido, se observa además que existe también una fuerte asociación entre el nivel de ingreso per cápita y el consumo de energía (Gráfica 137) y entre el consumo de energía y el nivel de emisiones, lo que se traduce en que las emisiones per cápita están estrechamente relacionadas al PIB per cápita (Stern, 2007).

**Gráfica 137. Relación entre el PIB per cápita y las emisiones y el consumo de energía del PIB per cápita en México**



Estas relaciones entre producto, población, consumo de energía y emisiones son, sin embargo, complejas y no lineales. Así, a nivel internacional se proyecta, por ejemplo, que en el largo plazo un crecimiento económico de 3% se corresponde con un aumento de las emisiones de 2% anual. Esto sugiere un proceso de descarbonización mundial esperado de 1% anual que se descompone tanto en una reducción de la intensidad energética como en la intensidad de las emisiones de energía. Por su parte, la tasa de crecimiento poblacional se ha reducido a nivel mundial de un máximo de 2.1% a finales de la década de los sesenta a una tasa de 1.5% actualmente, por lo que en el futuro aumentarán las emisiones per cápita y, por tanto no puede esperarse una estabilización de las emisiones sólo como consecuencia de una estabilización de la población mundial.

2. El proceso de mitigación es fuertemente dependiente del momento en que inicia y, desde luego de la meta propuesta. Esto es, las formas de mitigación son muy sensibles al nivel máximo y a su punto de corte<sup>73</sup>, por lo que retrasar un proceso de mitigación colectiva para después del 2020 o 2030 que tenga como objetivo estabilizar las emisiones a 550 ppm o menos, supone duplicar las tasas de mitigación requeridas. Ello, desde luego, tiene consecuencias económicas significativas y, en el extremo hace impráctica una meta de este nivel atendiendo a sus costos económicos.

Por ello posponer cualquier acuerdo internacional tiene costos económicos importantes que reducen su viabilidad. Estas metas de estabilización se traducen entonces en un nivel esperado, con sus rangos de probabilidad, de aumentos de la temperatura que se aprecia en el Cuadro 112. La construcción de un escenario de estabilización viable y factible económicamente debe considerar entonces que:

2.1. Estabilizar las emisiones en 450 ppm supone, con una probabilidad alta, un aumento de la temperatura de 1 a 2 grados con respecto a la temperatura actual (Meinshausen, 2006). Por su parte, estabilizar las emisiones a 550 implica una probabilidad de 99% de que el aumento en la temperatura alcance los 2 grados (Cuadro 112).

<sup>73</sup> Véase Stern (2007), Menshausen et al (2006) e IPCC, (2007).

2.2. Establecer una meta de 450 ppm resulta además difícil de alcanzar por los compromisos de mitigación que implica y el momento en el tiempo que requiere iniciar la trayectoria de reducciones. Las estimaciones realizadas (Stern, 2007) sugieren además que los costos de estabilizar a 450 ppm son tres veces más altos que estabilizar a 550 ppm<sup>74</sup>.

2.3. Estabilizar las emisiones a los niveles actuales no evita los impactos climáticos más relevantes. Las estrategias de mitigación actuales tienen un impacto marginal en los efectos negativos esperados del cambio climático en la primera parte de este siglo, aunque impactarán de manera decisiva lo que suceda en la segunda mitad del siglo. En este sentido, es necesario buscar una estrategia paulatina acordada internacionalmente que inicie lo más pronto posible.

2.4. Los riesgos de los peores impactos del cambio climático se reducen substancialmente en un escenario donde las emisiones se estabilizan entre 450 ppm y 550 ppm. Sin embargo, tiene riesgos inherentes ya que los procesos de retroalimentación pueden generar un aumento de 1 y 2 grados de temperatura para el 2100, en particular en el límite alto. En este sentido, existe una posibilidad significativa de enfrentar eventos climáticos extremos. De este modo, existen diferencias en las probabilidades de ocurrencia al estabilizar entre 450 ppm y 550 ppm, pero no se anulan las posibilidades de que se presenten los escenarios más intensos asociados al cambio climático. Ello supone mantener una administración de riesgos adecuada.

## CUADRO 112. LAS PROBABILIDADES (EN %) DE SUPERAR UN AUMENTO DE LA TEMPERATURA EN EL EQUILIBRIO

Nivel de estabilización (en ppm CO <sub>2</sub> e)	2° C	3° C	4° C	5° C	6° C	7° C
450	78	18	3	1	0	0
500	96	44	11	3	1	0
550	99	69	24	7	2	1
650	100	94	58	24	9	4
750	100	99	82	47	22	9

Fuente: Hadley Centre: De Murphy et al. 2004

2.5. Las trayectorias internacionales de estabilización más probables sugieren que alcanzar la meta de 450 ppm implica llegar a un máximo de emisiones en 10 años, para luego disminuir entre el 5 y 7% anual hasta alcanzar una reducción de 70% en el 2050 (IPCC, 2007). Para estabilizar a 550 ppm se requiere que las emisiones de GEI lleguen a su máximo nivel en 10 o 20 años y, luego disminuyan a una tasa de entre 1 a 3% al año y, que finalmente deberán representar sólo un 25% de los niveles actuales en el 2050 (IPCC, 2007, y Cuadro 113).

<sup>74</sup> Los costos sociales del carbono en un nivel de concentración de 550 ppm se estiman, inicialmente, en 25-30 dólares por tonelada.

## CUADRO 113. TRAYECTORIAS DE ESTABILIZACIÓN MÁS PROBABLE

Categoría	Adicional fuerza radiativa (W/m <sup>2</sup> )	Concentraciones de CO <sub>2</sub> (ppm)	CO <sub>2</sub> -eq concentración (ppm)	Incremento de la temperatura media global por encima del pre-industrial en el equilibrio usando "mejor estimación" sensibilidad climática <sup>a)</sup> <sup>b)</sup> (°C)	Años con emisiones de CO <sub>2</sub> máximas	Cambio en las emisiones globales de CO <sub>2</sub> en 2050 (% de emisiones del 2000) <sup>c)</sup>	No. de escenarios evaluados
I	2.5-3.0	350-400	445-490	2.0-2.4	2000-2015	-85 a -50	6
II	3.0-3.5	400-440	490-535	2.4-2.8	2000-2020	-60 a -30	18
III	3.5-4.0	440-485	535-590	2.8-3.2	2010-2030	-30 a +5	21
IV	4.0-5.0	485-570	590-710	3.2-4.0	2020-2060	+10 a +60	118
V	5.0-6.0	570-660	710-855	4.0-4.9	2050-2080	+25 a +85	9
VI	6.0-7.5	660-790	855-1130	4.9-6.1	2060-2090	+90 a +140	5
						Total	177

Nota:

La temperatura media global en equilibrio es diferente de la temperatura media global esperada en 2100 debido a la inercia del sistema climático.

- La relación simple  $T_{eq} = T_{2xCO_2} \times \ln(CO_2/278) / \ln(2)$  y  $\Delta Q = 5.35 \times \ln(CO_2/278)$  son usados. Sin linealidad en la retroalimentación puede causar dependencia temporal de la efectividad de la sensibilidad climática, como también seguir una mayor incertidumbre para más grandes niveles de calentamiento. La mejor estimación la sensibilidad climática (3o C) se refiere al mayor valor de probabilidad.
- Rangos correspondientes a el 15<sup>th</sup> a 85<sup>th</sup> percentiles del Post-Tercer informe de evaluación (TAR) distribución de escenario. Las emisiones de CO<sub>2</sub> son mostradas, escenarios de multi-gas pueden ser comparados con escenarios de CO<sub>2</sub>.

En este contexto, el escenario de estabilización que aparece como más eficiente económicamente y factible internacionalmente<sup>75</sup> se ubica entre 450 y 500 ppm y en el límite superior los 550 ppm, lo que implica con una probabilidad de 70% que la temperatura exceda los dos grados. Sin embargo, de no llegarse a un acuerdo internacional en el futuro inmediato es muy probable que los escenarios de 650 ppm se conviertan en los más probables que sugieren, con una probabilidad de casi 60%, un aumento de 4 grados de temperatura.

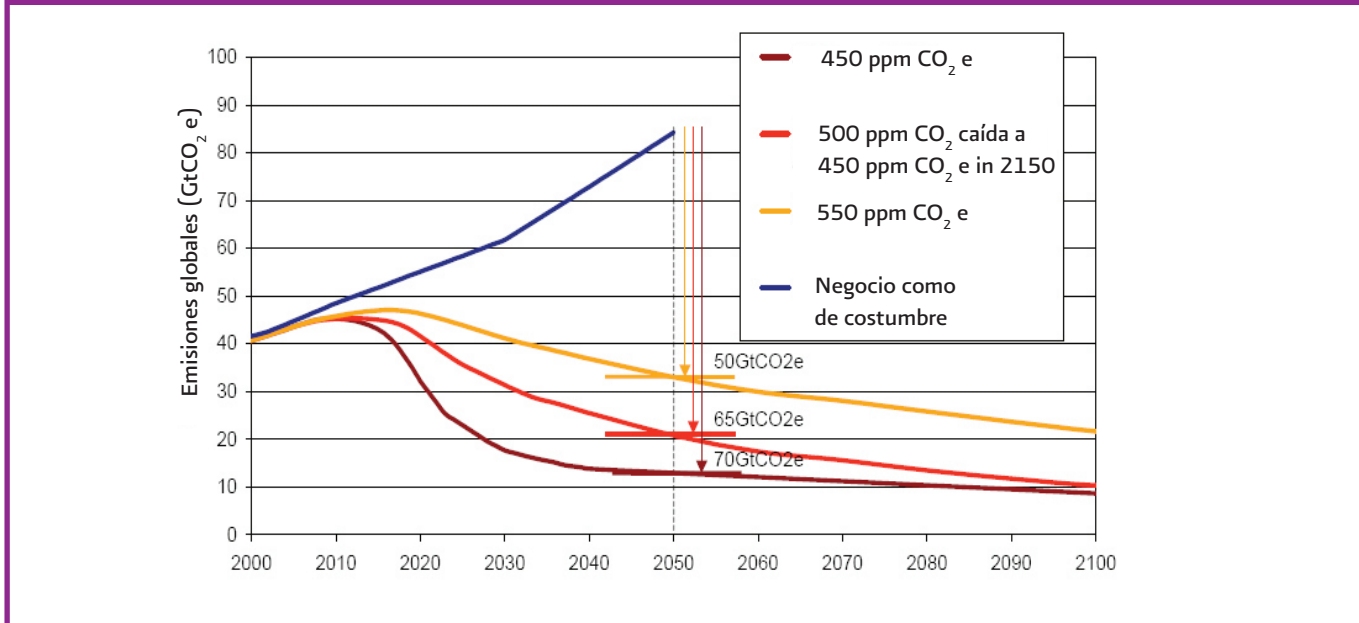
### 3. ESCENARIOS DE MITIGACIÓN PARA MÉXICO

La economía mexicana, atendiendo a sus condiciones socioeconómicas actuales, requiere mantener un ritmo de crecimiento sostenido y elevado en el mediano y largo plazo que le permita contribuir a resolver diversos desafíos sociales y económicos. El cambio climático debe entenderse entonces, como una restricción adicional al crecimiento económico que debe resolverse en el contexto de una negociación internacional y en donde México puede incluso obtener beneficios económicos de largo plazo. Esto es, la economía mexicana muestra una asimetría importante entre su contribución y los impactos que le ocasiona el cambio climático. México contribuye con aproximadamente el 1.5% de las emisiones totales de GEI, mientras que está expuesto a diversos impactos adversos cuyos costos resultan significativos en el largo plazo. En este contexto, resulta conveniente una estrategia que permita, dentro de un acuerdo internacional, estabilizar las concentraciones globales para reducir los impactos negativos del cambio climático y aprovechar las oportunidades que ofrece una nueva economía baja en carbono, sin dejar de reconocer la presencia de costos económicos importantes para la economía mexicana.

Los diversos acuerdos internacionales posibles incluyen distintas trayectorias de mitigación y de compromisos nacionales lo que tiene, desde luego, diferentes impactos en la economía mexicana. Así, el escenario más probable y/o deseable, dadas las condiciones inerciales actuales de un acuerdo internacional, sugiere buscar estabilizar en valores de entre 450 y 500 ppm lo que requiere reducir a nivel internacional, al menos, entre 65 y 70 GtCO<sub>2</sub> por año para el 2050 (Stern, 2007) (Gráfica 138).

<sup>75</sup> OCDE (2004) estima factible estabilizar a 450 ppm.

**Gráfica 138. Trayectorias de estabilización y emisiones bajo el escenario inercial o de BAU para 450-550 ppm CO<sub>2</sub>e**



Estos escenarios sugieren que para estabilizar las concentraciones en los niveles actuales para el 2050, requiere una reducción de las emisiones de entre 20 y 70% entre 2030 y 2050, aunque posteriormente estas reducciones lleguen incluso al 80% (Stern, 2007). En general, los escenarios que buscan estabilizar en niveles de entre 450 a 550 ppm consideran estabilizar las emisiones en el período del 2020 y el 2050. Estos escenarios implican un proceso de descarbonización acelerado a una tasa de entre 0.6 y 0.9% (o incluso un poco mayor a 1%) que es superior a la tasa histórica de 0.3% anual. En este sentido, reducir las concentraciones entre 60 a 80% requiere un proceso de descarbonización tres veces más alto que el histórico (IPCC, 2007). Ello es además consistente con los supuestos de reducir 60% de emisiones en los sectores de energía e industria y entre 30 y 40% en uso de suelo (IPCC, 2007). Este escenario puede ser viable para la economía mexicana en su conjunto, de mantenerse la tendencia reciente al desacoplamiento energético y la descarbonización, aunque es necesario en algunos sectores como el transporte y de generación de energía revertir las tendencias recientes. Asimismo, es indispensable detener el proceso de deforestación.

En este sentido, es posible y viable que México participe de manera articulada internacionalmente y reconociendo sus características particulares en un acuerdo internacional de mitigación. Atendiendo a las características de la economía mexicana esta estrategia de mitigación debe incluir diversos aspectos tales como:

1. Los mercados y los precios. En particular, es necesario considerar que la presencia de una externalidad negativa, como el cambio climático, puede reducirse o eliminarse al imponerle un precio o un impuesto. En este sentido, es indispensable imponer un precio a las emisiones (Stern, 2007).
2. Las regulaciones deben contribuir a reducir el contenido energético y de carbono por unidad de producto y *per cápita*. Estas regulaciones deben sin embargo evitar inhibir la innovación tecnológica. Ello es consistente con la evidencia que muestra que el mercado es insuficiente para resolver problemas ambientales tales como el caso del transporte (Stern, 2007), que es uno de los sectores que contribuyen en mayor medida a las emisiones.



3. La innovación tecnológica debe contribuir a ofrecer alternativas viables económicamente que permitan reducir la dependencia del producto a la energía y a las emisiones de GEI. Debe entonces apoyarse la constitución de mecanismos institucionales que apoyen la difusión del progreso técnico.
4. El gobierno debe orientar una modificación importante en los patrones actuales de consumo de la población que resultan insustentables en el largo plazo. Ello debe incluir cambios en las formas de movilidad y un ajuste en la demanda, dependiendo de los contenidos energéticos y de carbono de las mercancías.

#### 4. EVOLUCIÓN RECIENTE DE LAS EMISIONES EN MÉXICO

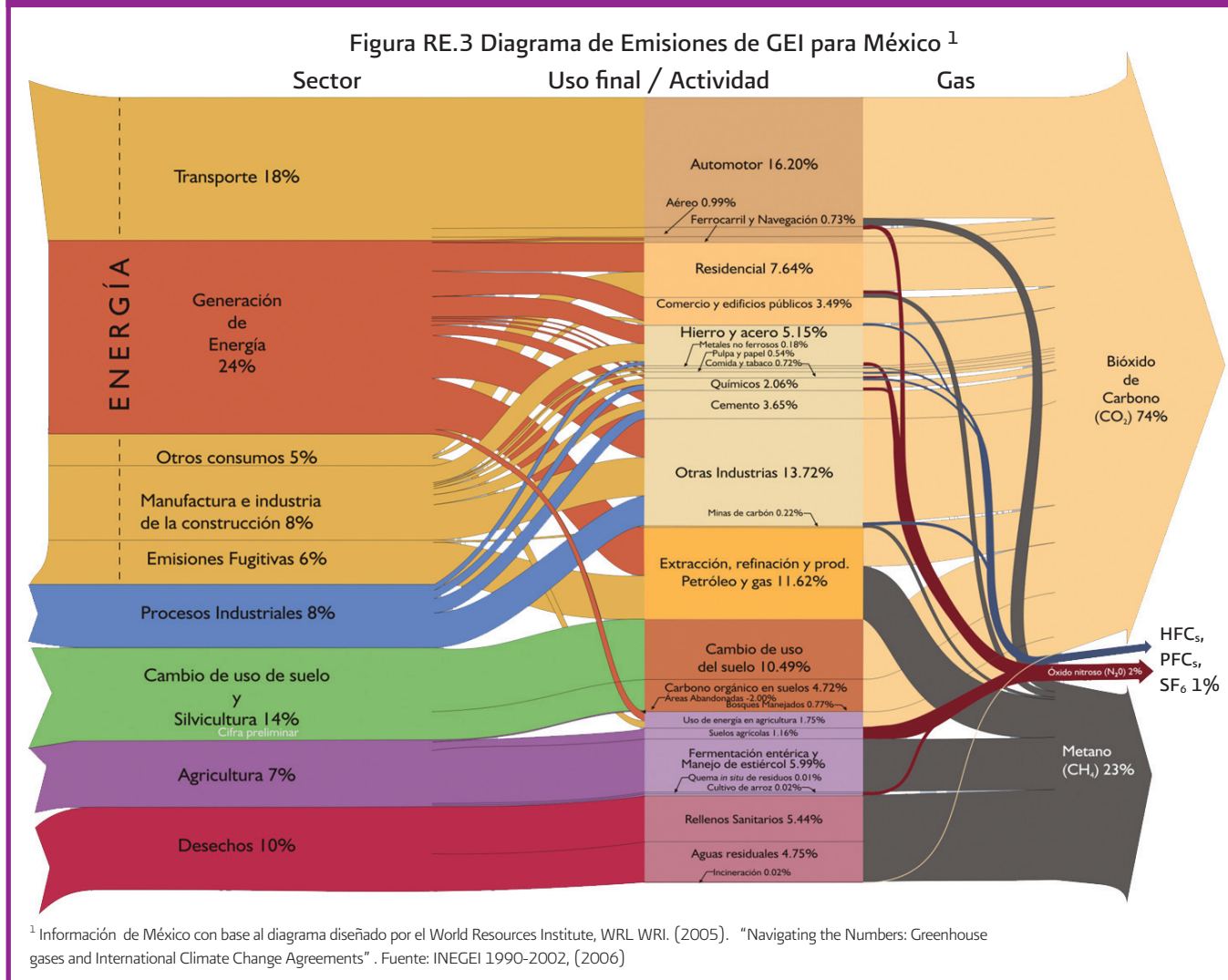
Las principales tendencias de las emisiones de GEI en México pueden sintetizarse en los siguientes puntos (INEGI, 2007):

- Las emisiones totales de GEI en el 2002 fueron de 553,268 Gg en equivalentes de CO<sub>2</sub>, que representa un incremento del 30% con respecto a 1990. Estas emisiones incluyen los 6 principales GEI contemplados por el Protocolo de Kioto (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, HFCs, PFCs y SF<sub>6</sub>) de las categorías de energía, procesos industriales, agricultura y desechos. A ello es necesario incluir además las emisiones por cambio de uso de suelo.
- La mayor contribución a las emisiones totales proviene de la categoría de energía que aporta en promedio anualmente, el 72% de las emisiones totales para el periodo 1990-2002. Dentro de esta categoría de emisión, el consumo de combustibles fósiles es la primera fuente de emisiones de GEI al contribuir con el 64% de las emisiones totales cada año.
- Las emisiones provenientes de desechos en el 2002 muestra que aumentaron en un 97% desde 1990 mientras que los procesos industriales lo incrementaron 60% de 1990 al 2002. El aumento de las emisiones de los desechos se origina en el incremento en la disposición de residuos sólidos en rellenos sanitarios y al impulso dado en la última década al tratamiento de las aguas residuales industriales y municipales.
- Las emisiones de la agricultura disminuyeron en 3% al 2002.
- Las emisiones de CO<sub>2</sub> se incrementaron en 28% respecto a 1990 debido al consumo de energéticos en los sectores de transporte y a la industria generadora de electricidad.

La estructura de emisiones de GEI puede, en principio, asociarse en una correspondencia general con sus fuentes de origen. En efecto, la Figura 19 muestra la estructura de las emisiones para México en el 2002 y sus relaciones a los principales sectores económicos. Así, las emisiones de GEI para 2002 en unidades de CO<sub>2</sub> equivalentes, y con cifras preliminares de la categoría de uso de suelo y silvicultura se estimaron en 643,183 Gg tomando en cuenta los 6 gases del protocolo de Kioto.

- Las emisiones de GEI en la categoría de energía presentan una tasa media anual de crecimiento de aproximadamente 2% anual de 1990 a 2002, que es menor a la tasa de crecimiento del PIB para el mismo periodo que fue de 3.1%. Ello refleja el proceso de desacoplamiento paulatino de las emisiones a producto en México.
- Las emisiones del sector transporte representaron un 29% del total para el 2002.

Figura 19. Emisiones GEI por fuente en México en el 2002



- El principal gas emitido por la categoría de Procesos Industriales es el CO<sub>2</sub>, que en el 2002 representó el 90% de las emisiones en esta categoría.
- El sector agrícola disminuyó sus emisiones derivado de la importación de granos básicos, como el arroz y del estancamiento del sector pecuario.
- En términos del CO<sub>2</sub> la categoría de uso de suelo, cambio de uso de suelo y silvicultura aporta cerca de 86,877 Gg. Estas emisiones son el resultado del balance entre 64,484 Gg provenientes de la combustión y descomposición de biomasa aérea asociada a los procesos de conversión de bosques a otros usos; 30,344 por emisiones derivadas de los suelos minerales y áreas agrícolas; 4,932 Gg por emisión en bosques manejados y una captura de 12,883 Gg en tierras abandonadas.
- Las emisiones de GEI por desechos, en CO<sub>2</sub> equivalente, tuvieron un incremento de 96% de 1990 al 2002 como resultado del incremento en la disposición de residuos sólidos en rellenos sanitarios y del impulso dado en la última década al tratamiento de aguas residuales industriales y municipales.

## 5. EMISIONES Y ACTIVIDADES ECONÓMICAS EN MÉXICO

Las emisiones de GEI y su relación con las fuentes de emisiones son el resultado de un complejo sistema dinámico, con rezagos y costos de ajuste importantes, que además está sujeto a distintos tipos de *shocks*. Existe un intenso debate sobre las formas, las magnitudes y las elasticidades de esta relación entre emisiones de GEI y los procesos económicos. La formalización de las relaciones entre emisiones, consumo de energía, producto y población puede realizarse de acuerdo a la conocida identidad de Kaya (1989) o IPAT (O'Neill et al., 2003, Perman, et al, 2003 y Yamaji, et al, 1991). Esta identidad permite elaborar tanto un escenario base (BAU) como escenarios alternativos a través de descomponer la contribución a las emisiones en aquellas asociadas a población, al producto *per cápita*, a la tecnología y al consumo de energía (Bongaart, 1992, Stern 2007, IPCC, 2007).

### IPAT o identidad de Kaya

En su forma más simple un impacto ambiental, como por ejemplo la energía o las emisiones, puede asociarse a la evolución del producto o de la población (ecuaciones (1.1) y (1.2)). Estas identidades hacen depender entonces a las trayectorias de energía o de emisiones de la evolución del PIB o de la población y de los cambios en los coeficientes de intensidad energética o de emisiones a producto o de energía o emisiones per cápita.

(1.1) Impacto ambiental = población X impacto ambiental

(1.2) Impacto ambiental = producto X impacto ambiental

Esta identidad del IPAT se desagrega como (Perman, McGilbrav y Common, 2003):

$$(2) \quad I = P \times A \times T$$

Donde: I = Impacto, P = Población, A = Riqueza (Affluence) y T = Tecnología La ecuación (2) se representa como:

$$(3) \quad I = \left[ \frac{POB}{POB} \right] \times \left[ \frac{PIB}{POB} \right] \times \text{Impacto por unidad de producto}$$

La ecuación (3) para el consumo de energía y de emisiones puede remplazarse como:

$$(3.1) \quad ENERG = \left[ \frac{POB}{POB} \right] \times \left[ \frac{PIB}{POB} \right] \times \left[ \frac{ENERG}{PIB} \right]$$

$$(3.2) \quad CO_2 = \left[ \frac{POB}{POB} \right] \times \left[ \frac{PIB}{POB} \right] \times \left[ \frac{CO_2}{PIB} \right]$$

Además es posible descomponer el coeficiente de emisiones a producto incluyendo el coeficiente de emisiones a energía:

$$(4) \quad CO_2 = \left[ \frac{POB}{POB} \right] \times \left[ \frac{PIB}{POB} \right] \times \left[ \frac{ENERG}{PIB} \right] \times \left[ \frac{CO_2}{ENERG} \right]$$

Además es posible descomponer el coeficiente de emisiones a producto incluyendo el coeficiente de emisiones a energía:

$$(5.1) \quad \Delta ENERG = \Delta \left[ \frac{POB}{POB} \right] + \Delta \left[ \frac{PIB}{POB} \right] + \Delta \left[ \frac{ENERG}{PIB} \right]$$

$$(5.2) \quad \Delta CO_2 = \Delta \left[ \frac{POB}{POB} \right] + \Delta \left[ \frac{PIB}{POB} \right] + \Delta \left[ \frac{CO_2}{PIB} \right]$$

$$(5.3) \quad \Delta CO_2 = \Delta \left[ \frac{POB}{POB} \right] + \Delta \left[ \frac{PIB}{POB} \right] + \Delta \left[ \frac{ENERG}{PIB} \right] + \Delta \left[ \frac{CO_2}{ENERG} \right]$$

Normalizando esta descomposición<sup>76</sup> de tasas de crecimiento y analizando la contribución porcentual de cada uno de los factores (Bongarts, 1992):

<sup>76</sup> Esta descomposición es correcta solo con tasa de crecimiento continuo (O'Neill et al., 2003)

$$(6.1) \quad 1 = \left[ \frac{\Delta POB}{\Delta ENERG} \right] + \left[ \frac{\Delta \left( \frac{PIB}{POB} \right)}{\Delta ENERG} \right] + \left[ \frac{\Delta \left( \frac{ENERG}{PIB} \right)}{\Delta ENERG} \right]$$

$$(6.2) \quad 1 = \left[ \frac{\Delta POB}{\Delta CO_2} \right] + \left[ \frac{\Delta \left( \frac{PIB}{POB} \right)}{\Delta CO_2} \right] + \left[ \frac{\Delta \left( \frac{CO_2}{PIB} \right)}{\Delta CO_2} \right]$$

$$(6.3) \quad 1 = \left[ \frac{\Delta POB}{\Delta CO_2} \right] + \left[ \frac{\Delta \left( \frac{PIB}{POB} \right)}{\Delta CO_2} \right] + \left[ \frac{\Delta \left( \frac{ENERG}{PIB} \right)}{\Delta CO_2} \right] + \left[ \frac{\Delta \left( \frac{CO_2}{ENERG} \right)}{\Delta CO_2} \right]$$

Es Común considerar constan a una variable o a todas las variables menos una (Bartiaux y Van Ypersele, 1993, Heiling, 1994, Howard et al 1991, Ang, 1993 y Moonmaw y Tullis, 1998).

La evidencia internacional sobre estos coeficientes y su evolución se sintetiza en el Cuadro 114. Así, se observa que la tasa de crecimiento de las emisiones es menor que el ritmo de crecimiento del PIB per cápita y ligeramente superior al crecimiento de la población. Gracias al proceso de desacoplamiento energético y de descarbonización de las emisiones a energía. Esto es, a nivel global se espera, por ejemplo un crecimiento económico del 3% y un aumento de las emisiones de 2%, lo que sugiere un proceso de descarbonización de 1%, anual que se descompone en la reducción de la intensidad energética y en la intensidad de emisiones a energía. La evidencia histórica sugiere una reducción de las emisiones a energía de 0.3% anual y un desacoplamiento energético de 1% por lo que se supone como BAU un escenario de reducción de emisiones de 1.3%. La evidencia disponible para México indica, dentro de la identidad del IPAT, que el crecimiento de las emisiones se debe en 77% al ingreso *per cápita* y el 69% a la evolución de la población, mientras que la reducción en la intensidad energética contribuyó en -33% (IPCC, 2007).

## CUADRO 114. TASAS CLAVES PARA LAS EMISIONES DE ENERGÍA DE CO<sub>2</sub> EN 2002

País/Grupo	CO <sub>2</sub> per capita (tCO <sub>2</sub> )	PIB per capita (\$ppp2000)	CO <sub>2</sub> emisiones/uso de energía (tCO <sub>2</sub> /toe)	Uso de energía /PIB (toe/\$ppp2000 x 10 <sup>6</sup> )
USA	20.4	34430	2.52	230.8
EU	9.4	23577	2.30	158.0
UK	9.6	27176	2.39	140.6
Japón	9.8	26021	2.35	155.7
China	3.0	4379	3.08	219.1
India	1.1	2555	2.05	201.3

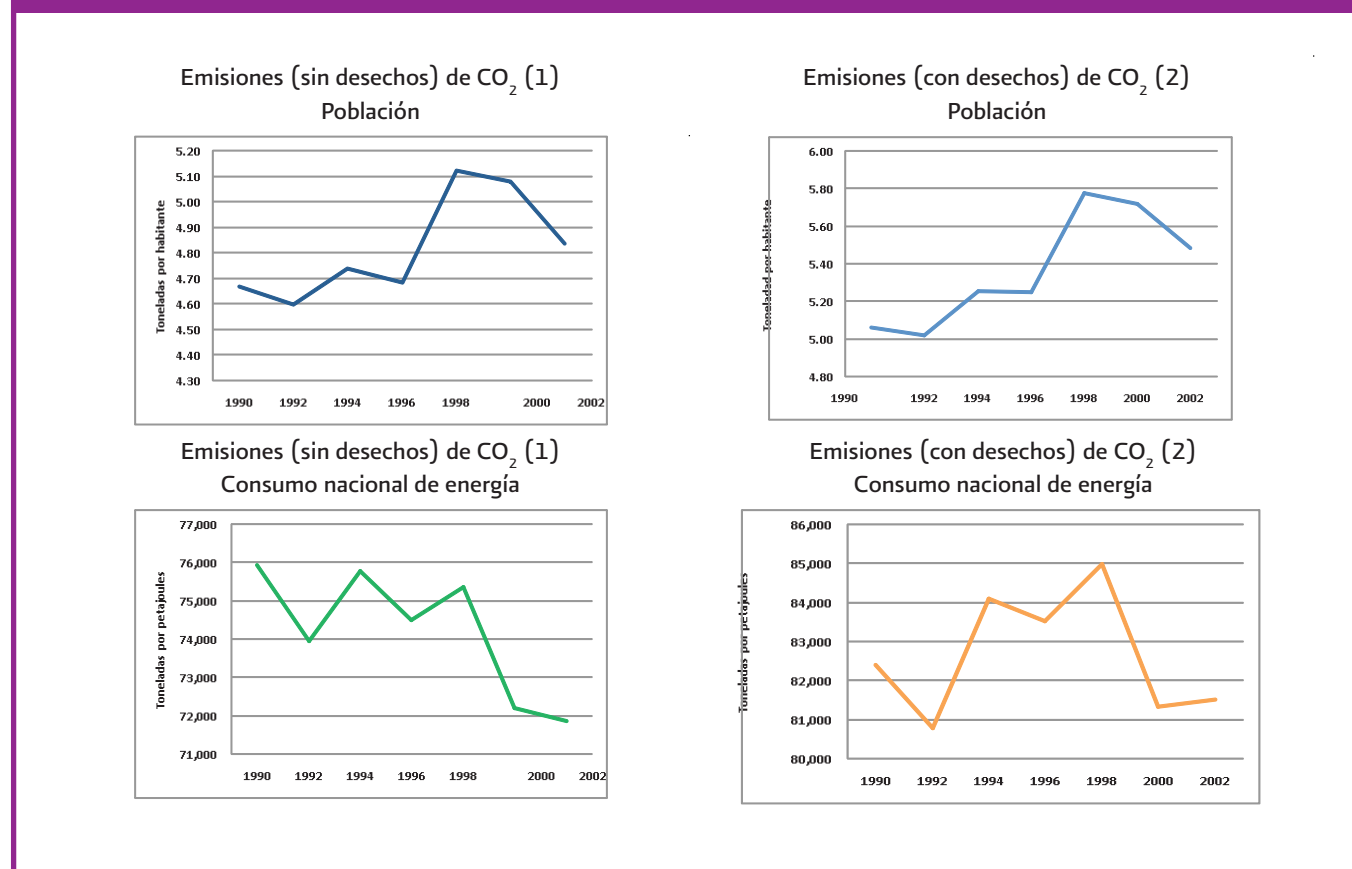
## CUADRO 114. TASAS CLAVES PARA LAS EMISIONES DE ENERGÍA DE CO<sub>2</sub> EN 2002 (CONTINUACIÓN)

OECD	11.7	24351	2.41	193.0
Economías en transición	7.7	7123	2.57	421.2
No incluidos en el anexo 1	2.2	3870	2.48	217.8
Mundial	4.0	7649	2.43	219.5

Fuente: WRI (2006)

La evidencia disponible muestra que existen cambios en las intensidades energéticas a población y a producto y en las intensidades de emisiones a energía. En efecto, se observa que la razón de emisiones totales de CO<sub>2</sub> a población es la que más aumenta mientras que las razones de CO<sub>2</sub> a PIB, energía a PIB y de CO<sub>2</sub> a energía muestran una ligera tendencia decreciente e incluso se observa una reducción en la razón de emisiones asociadas a la energía a PIB. Ello sugiere que la razón de emisiones a población en México aumentará como consecuencia de un incremento del ingreso per cápita, pero que puede mantenerse un proceso simultáneo de desacoplamiento energético y de descarbonización (Gráfica 139).

Gráfica 139. Emisiones (sin desechos y con desechos) de CO<sub>2</sub> / Población/ Consumo nacional de energía (1990-2002)



Las principales tendencias puntuales de estos comportamientos son:

- Las emisiones por tonelada *per cápita* crecieron inicialmente para después mostrar una tendencia descendente a partir de 1998.
- La tasa de reducción de las emisiones para el periodo 1998-2002 es de 1.04% anual.
- La intensidad energética a producto creció hasta 4.53 petajoules por miles de millones de pesos para después reducirse. En este contexto, destaca la reducción de la intensidad energética a una tasa anual de 1.27% para el periodo 1996-2002.

Con objeto de complementar las opciones de política pública, se incluyeron simulaciones de precios de acuerdo a las elasticidades ingreso y precio de la demanda de energía de largo plazo sintetizado en el Cuadro 115.

### CUADRO 115. ECUACIONES NORMALIZADAS DEL CONSUMO DE ENERGÍA NACIONAL Y POR SECTORES $ec_{it} = \beta_1 * yit + \beta_2 * pre_t$

Coefficiente	$cne_t$	$ceie_t$	$cea_t$	$cei_t$	$cer_t$	$cec_t$	$cet_t$
$\beta_0$	-15.892	-7.441	-11.979	-8.432	-4.975	-10.597	-12.916
$\beta_1$	1.170	0.881	0.865	0.792	0.550	0.760	1.049
$\beta_2$	-0.156	-0.158	-0.251	-0.328	-0.236	-0.222	-0.397

Notas: Las letras en minúsculas representan los valores en logaritmos naturales. Periodo 1966-2006.

Donde:  $cne_t$  = consumo nacional de energía;  $ceie_t$  = consumo de energía de las industrias energéticas;  $cea_t$  = consumo de energía de la agricultura;  $cei_t$  = consumo de energía de la industria;  $cer_t$  = consumo de energía del sector residencial;  $cec_t$  = consumo de energía del sector comercio;  $cet_t$  = consumo de energía del transporte.

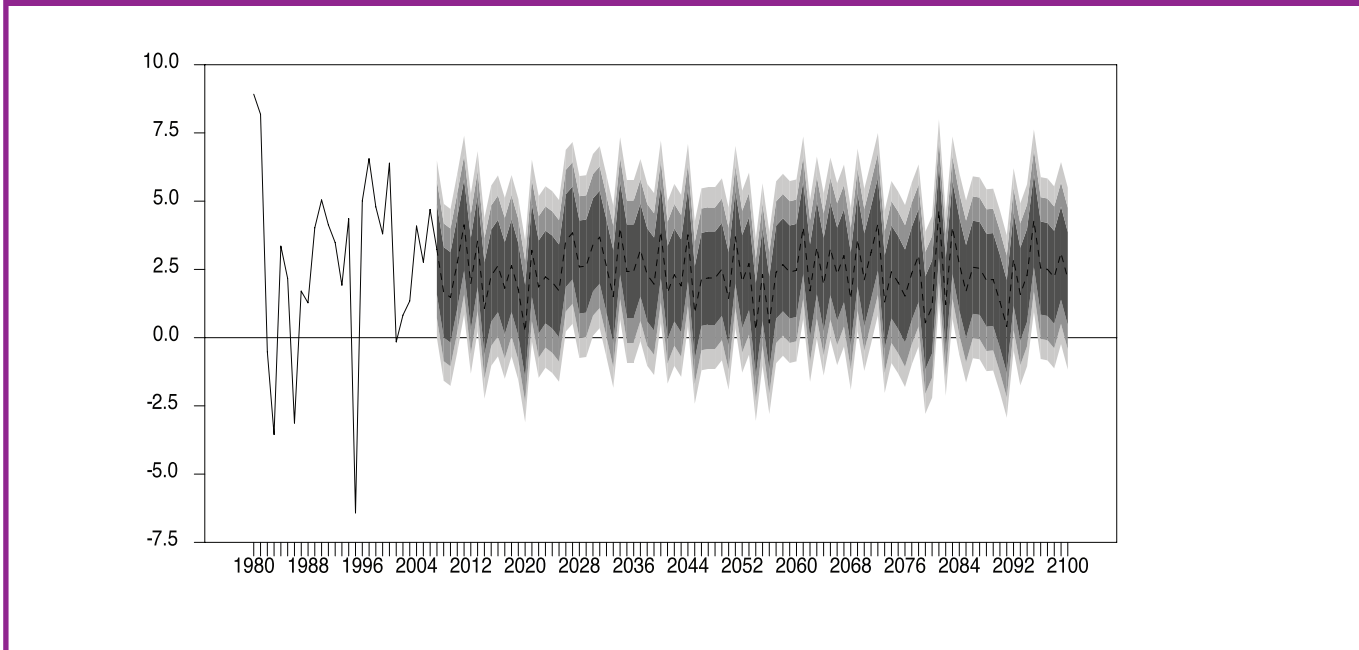
Los supuestos de las proyecciones básicas consideradas son las siguientes, que no necesariamente coinciden con las medias esperadas de los modelos ARIMA:

1. **Tasa de crecimiento del PIB.** La trayectoria base de la tasa de crecimiento del PIB es 3.5% con un rango entre 4.10 y 0.69% con un 60% probabilidad (Cuadro 116 y Gráfica 140).

### CUADRO 116. PRONÓSTICOS DE LA TASA DE CRECIMIENTO DEL PIB NACIONAL (PORCENTAJE)

Periodos Nacional	Probabilidad 60% Límite superior	Media	Probabilidad 60% Límite inferior
2008-2030	4.08	2.39	0.70
2031-2050	4.15	2.45	0.75
2051-2100	4.08	2.38	0.67
2008-2100	4.10	2.40	0.69

**Gráfica 140. Fan Chart de la tasa de crecimiento del PIB Nacional 1980-2100 (Porcentajes)**

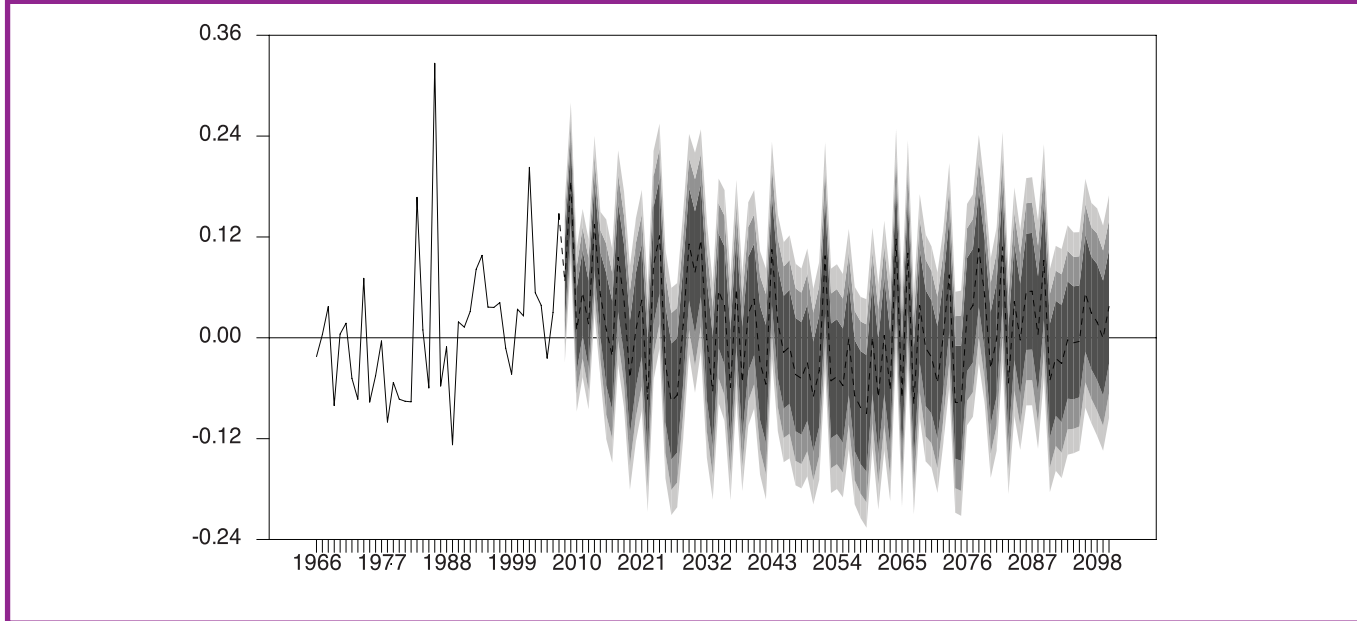


2. **Los precios relativos de la energía.** Los precios relativos de la energía se consideran como variable de política. No obstante ello, se incluye un modelo ARIMA con sus respectivas distribuciones de probabilidad como una base indicativa del comportamiento inercial (Cuadro 117 y Gráfica 141). Así, los precios relativos de la energía con un 60% de probabilidad se ubicará en un rango muy amplio, entre 7.5 y -5.82%. Ello hace muy incierto un pronóstico puntual.

**CUADRO 117. PRONÓSTICOS DE LA TASA DE CRECIMIENTO DE LOS PRECIOS RELATIVOS DE LA ENERGÍA (PORCENTAJE)**

Periodos	Probabilidad 60% Limite superior	Media	Probabilidad 60% Limite inferior
2008-2030	9.83	3.56	-2.71
2031-2050	6.68	-0.08	-6.85
2051-2100	6.76	-0.04	-6.85
2007-2100	7.50	0.84	-5.82

**Gráfica 141. Fan Chart de la tasa de crecimiento de los precios relativos de la energía 1965 - 2100 (Porcentajes)**



**3. La evolución de la población.** La trayectoria de la población se obtuvo de los escenarios de CONAPO que se sintetizan en el Cuadro 118.

### CUADRO 118. TASAS DE CRECIMIENTO DE LA POBLACIÓN

	2008-20	2021-30	2031-40	2041-50	2008-50
Tasas de crecimiento de la población	0.69	0.44	0.16	-0.08	0.33

- 4. La evolución del PIB y de la población.** Permite obtener la evolución del PIB per cápita.
- 5. Las razones de energía a PIB y de emisiones de CO<sub>2</sub> a energía.** Se utilizaron como variables de política pública y sus variaciones se identificaron con la tasa de desacoplamiento de 1998-2002.

Los escenarios nacionales considerados se sintetizan en el cuadro 119.



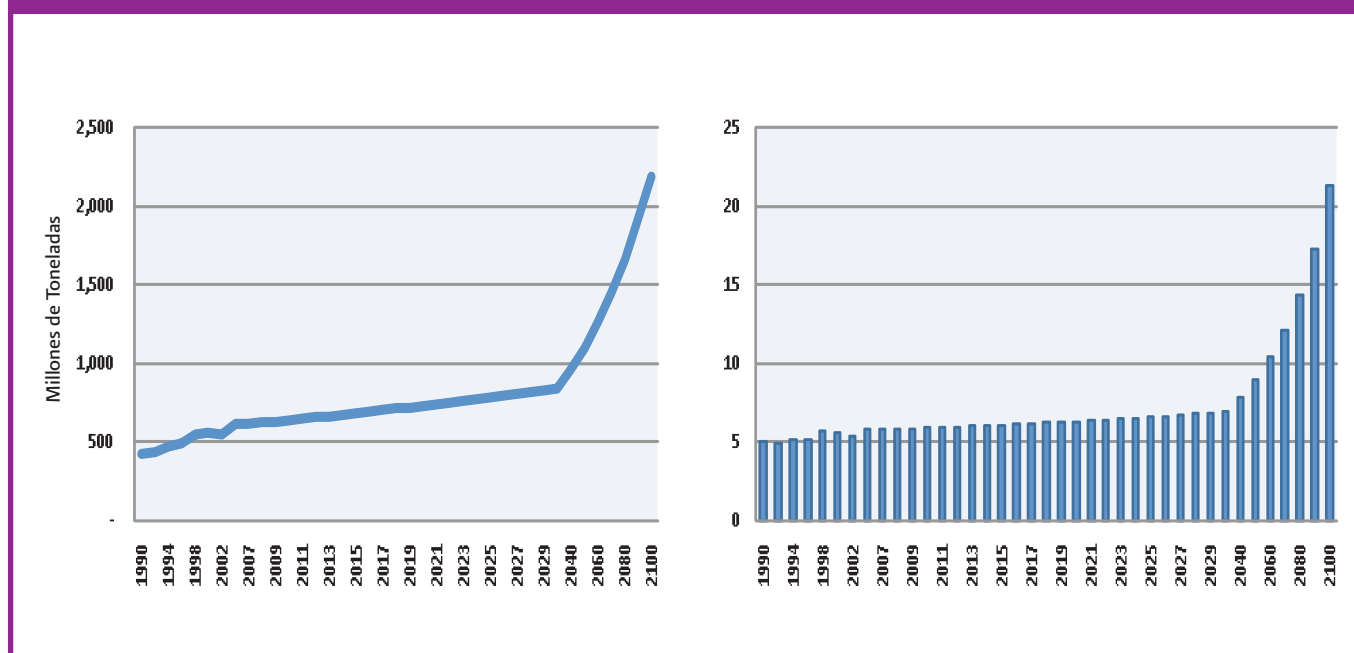
## CUADRO 119. ESCENARIOS NACIONALES

Escenario	PIB (a)	Población (b)	PIB per cápita	Energía/PIB	CO <sub>2</sub> /Energía	Precios de la energía
E1: Business as usual (BAU)	3.5%	CONAPO	a/b	Valor del 2002	Valor del 2002	
E2: base mas evolución histórica de innovación tecnológica	3.5%	CONAPO	a/b	Reducción de acuerdo a las tendencias de 1990-2002	Reducción de acuerdo a las tendencias de 1990-2002	
E3: desacoplamiento acelerado	3.5%	CONAPO	a/b	Reducción de 2% <sup>a</sup>	Reducción de 1% <sup>a</sup>	
E4: aumento de precios e innovación tecnológica	3.5%	CONAPO	a/b	Reducción de 1%	Reducción de 1%	Aumento de 3%

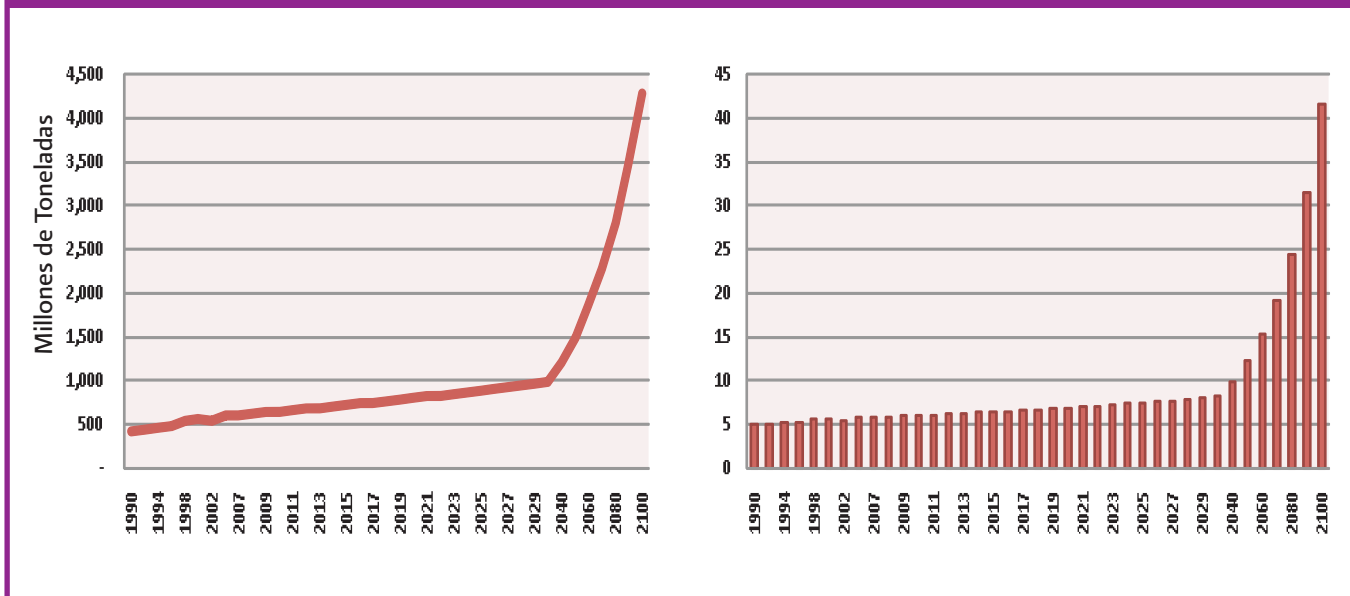
Notas: a) Estas tasas son ligeramente superiores a las tasas de desacoplamiento históricas de Estados Unidos que se ubican entre 0.8% y 1.4% aunque en un rango posible ya que para algunos años han llegado al 5%. En todo caso debe reconocerse que la posibilidad de estas tasas requiere una participación activa del estado.

Con base a estos escenarios se obtuvieron las emisiones totales y per cápita de CO<sub>2</sub> que se presentan en las gráficas 142 a 145. De esta forma, en el escenario E1 se obtienen emisiones por 2,184 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>, y 2.28 emisiones *per capita* como resultado de la dinámica poblacional y del incremento en el PIB de 3.5%. En el escenario E2, las emisiones son substancialmente mayores, debido principalmente a que el coeficiente de desacoplamiento energético mantiene un comportamiento muy volátil y, en el 2002 tiene una tasa de -1.33, mientras que el promedio del periodo 1990-2002 es de -0.6, lo que genera emisiones de 4,275 millones de toneladas.

Gráfica 142. Proyecciones de Emisiones de CO<sub>2</sub> totales y *per cápita* bajo el escenario E1

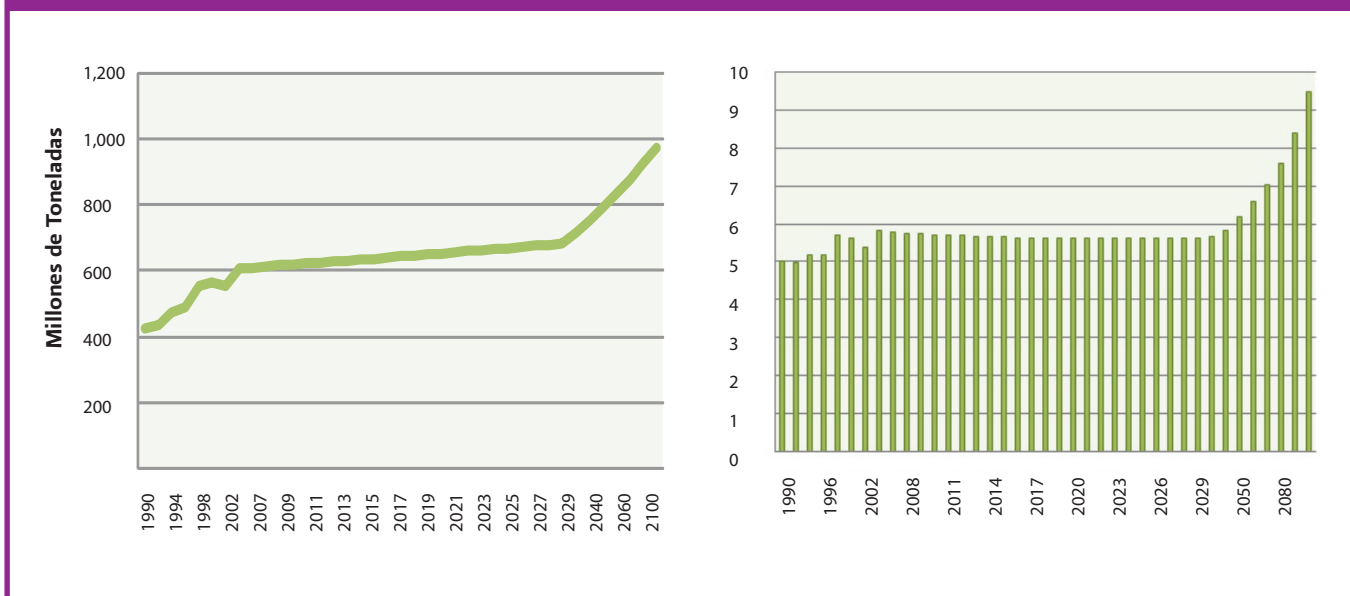


**Gráfica 143. Proyecciones de Emisiones de CO<sub>2</sub> totales y per cápita bajo el escenario E2**

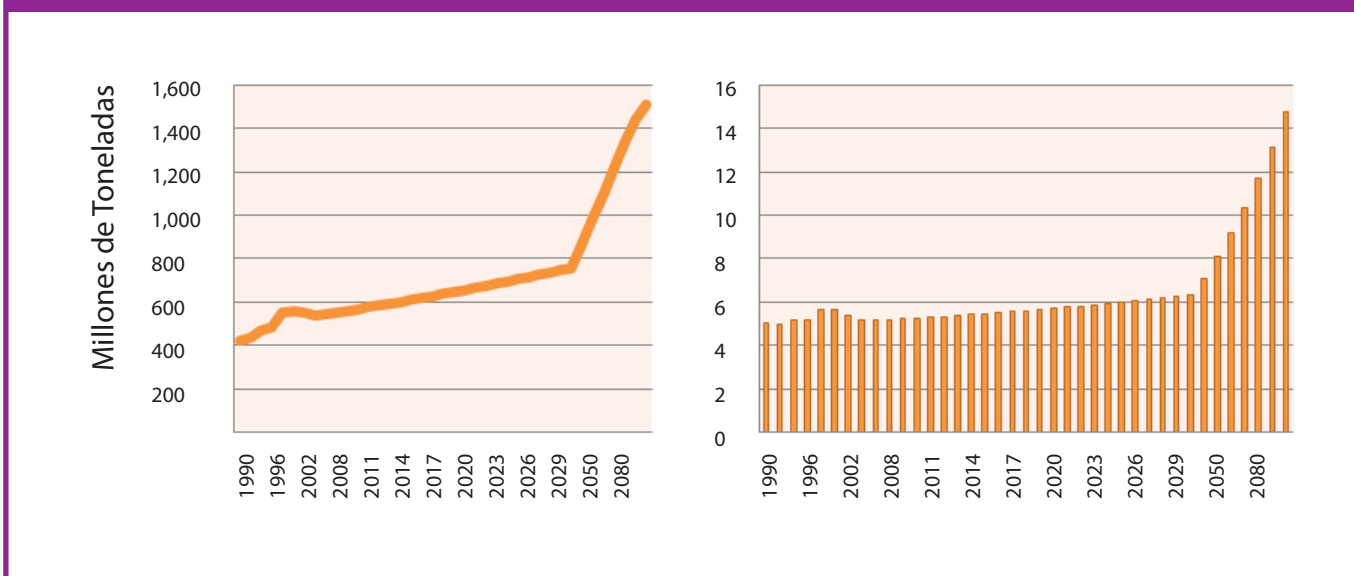


El escenario que presenta las menores emisiones es el E3, en el que se supone una tasa de desacoplamiento energético del 2% y una tasa de descarbonización del 2%, tasas que corresponden a una mayor innovación tecnológica. Bajo este escenario se puede llegar a 974 millones de toneladas de emisiones de CO<sub>2</sub>, y de 9.49 per cápita (Gráfica 144). La política de un incremento de 3% en los precios relativos incide relativamente poco en la reducción de emisiones, ya que este incremento se traduce en una tasa de disminución de 0.2% en la eficiencia energética. En consecuencia, con el escenario E4 se generan más emisiones en comparación con el E3 de modo que al 2100 se pronostican 1,515 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> (Gráfica 145).

**Gráfica 144. Proyecciones de Emisiones de CO<sub>2</sub> totales y per cápita bajo el escenario E3**



Gráfica 145. Proyecciones de Emisiones de CO<sub>2</sub> totales y *per cápita* bajo el escenario E4



#### ESCENARIOS SECTORIALES:

### CUADRO 120. ESCENARIOS SECTORIALES

Escenario	PIB (a)	Población (b)	PIB per capita	Energía/PIB	CO <sub>2</sub> /Energía
E5: Business as usual (BAU)	Tasas de crecimiento de cada sector estimadas más probables al 60%	CONAPO	a/b	Tasa promedio del periodo 1990-2002	Tasa promedio del periodo 1990-2002
E6: reducción de emisiones de 1 % anual	Tasas de crecimiento de cada sector estimadas más probables al 60%	CONAPO	a/b	Reducción de 1%	Reducción de 1%
E7: desacoplamiento acelerado	Tasas de crecimiento de cada sector estimadas más probables al 60%	CONAPO	a/b	Coeficientes que generan crecimiento cero de emisiones	

## 6. COSTOS DE LA MITIGACIÓN EN MÉXICO

La evaluación económica de los costos de mitigación es ciertamente una tarea muy compleja con un alto grado de incertidumbre. Los costos de la mitigación dependen de factores tales como, las estrategias instrumentadas acordadas a nivel internacional incluyendo sus ritmos e intensidades, la disponibilidad de tecnología, sus costos y sus formas de difusión, los cambios en la estructura productiva y su relación con el consumo de energía, opciones de sustitución, curvas de costos marginales y elasticidades de demanda e incluso el precio de la tonelada de carbono.

A nivel global existen distintas estrategias posibles de mitigación que tienen desde luego distintos costos asociados. En principio, la estrategia más probable sugiere buscar estabilizar por debajo de 550 (entre 450 y 550 ppm), lo que implica que las emisiones alcancen un nivel máximo dentro de 10 o 20 años y que luego se reduzcan, al menos, a una tasa de entre 1 a 3% anual, de modo que se llegue a una meta de 25% debajo de los niveles de emisiones actuales para el 2050. Ello supone, por ejemplo, que las tasas históricas internacionales de descarbonización que se ubican en valores de 0.3% anual aumenten, al menos, a tasas de 0.6 o 0.9% (IPCC, 2007) y que se combinen con reducciones en las intensidades energéticas.

El IPAT muestra que dados los escenarios futuros sobre la población y el condicionamiento a un aumento continuo del PIB per cápita, es en el desacoplamiento energético y en emisiones (descarbonización) donde se ubican las opciones de mitigación más importantes. Debe destacarse que, desde la óptica económica, lo relevante no es sólo la disponibilidad de las tecnologías sino el costo económico de ellas lo que plantea su viabilidad. La evidencia disponible muestra la presencia de diversas opciones tecnológicas y de política pública que permiten obtener los niveles de reducciones de emisiones requeridos.

Una estimación internacional de largo plazo de los costos de abatimiento por tonelada de CO<sub>2</sub> se presenta en la Gráfica 146. En ella se observa que la tasa de reducción en los costos es de aproximadamente 3% anual del 2000 al 2050, lo que reducirá en el futuro significativamente estos costos.

## CUADRO 121. ESTIMACIÓN GLOBAL MACRO ECONÓMICA DE LOS COSTOS EN 2050 EN LAS DIFERENTES TRAYECTORIAS DE ESTABILIZACIÓN A LARGO PLAZO DE LOS OBJETIVOS

Niveles de estabilización (ppm CO <sub>2</sub> -eq)	Media de de reducción del PIB (%) b)	Rango de reducción del PIB (%) b), c)	Reducción de la media anual de tasas de crecimiento del PIB (puntos porcentuales) b), d)
590-710	0.5	-1 – 2	<0.05
535-590	1.3	Ligeramente negativo -4	<0.1
445-535e)	No disponible	<5.5	<0.12

Notas:

a) Esto corresponde a la plena literatura en todos los parámetros de referencia y escenarios de mitigación que proporcionan los números de PIB.

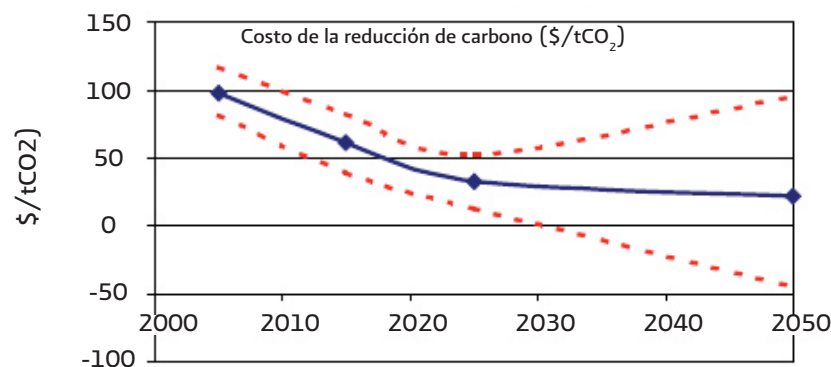
b) Este es el PIB global de mercado basado en los tipos de cambio.

c) La media del rango del 10° al 90° percentil.

d) El cálculo de la reducción de la tasa de crecimiento anual se basa en la reducción media durante el período hasta 2050 que resultaría de la disminución del PIB en 2050.

e) El número de estudios es relativamente pequeño y por lo general uso bajo las líneas de base. Alto emisiones de las líneas de base suelen dar lugar a costos más elevados.

**Gráfica 146. Costo medio de la reducción de las emisiones de combustibles fósiles de GtCO<sub>2</sub> en 2050**



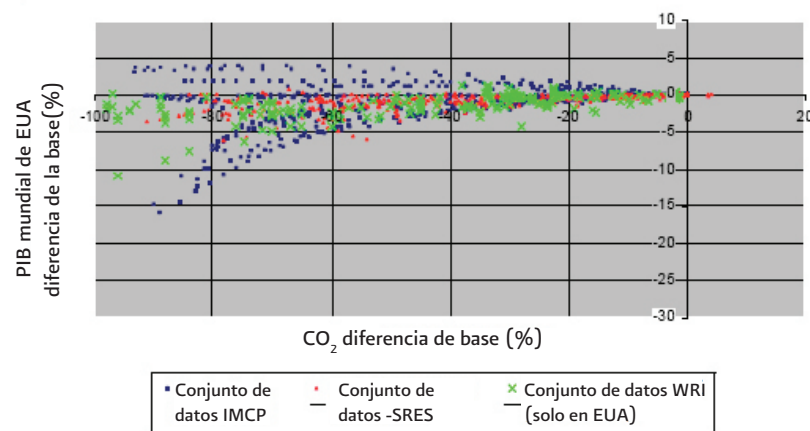
Las líneas rojas representan la incertidumbre en torno a los de la estimación central, estos se han calculado utilizando Análisis de Monte Carlo. Para cada tecnología, la gama completa de los posibles costos (normalmente  $\pm 30\%$  de nuevas tecnologías  $\pm 20\%$  para las ya establecidas) se especifican. Del mismo modo, los futuros precios del petróleo se especifican como distribuciones de probabilidad y las futuras demandas de energía (f2-6/GJ), los precios del carbón y las futuras demandas de energía (para permitir la incertidumbre de la tasa de absorción de la eficiencia energética). Esto produce una distribución de probabilidad que se base para los rangos dados.

Las opciones y la difusión de tecnologías es, sin embargo, un aspecto en extremo complejo que se refleja en un rango elevado de estimaciones de costos (Gráfica 147). Esto es, las regulaciones como lo incentivos de la demanda o las nuevas oportunidades favorecen la innovación tecnológica (Jaffe y Palmer, 1996). Así, desde la óptica de la política pública, este conjunto de factores deben de incentivarse manteniendo las opciones flexibles.

La estrategia de mitigación de las emisiones debe incluir entonces acciones específicas para cada sector pero manteniendo libre la opción de tecnologías, sin imponer una tecnología específica.

**Gráfica 147. Dispersión del modelo de proyección de costos**

Costo de las reducciones de las emisiones de CO<sub>2</sub> como una fracción del PIB con el nivel de reducción



Fuente: Brohan et al. (2006)

Existe desde luego, diversas formas de estimar estas curvas de costos de abatimiento para toda la economía o por sectores tales como utilizar, individualmente o en forma combinada, un modelo macroeconómico ya sea econométrico o de equilibrio general computable (tipo *top down*), a estimaciones basados en modelos de ingeniería (*bottom up*) o a través de un meta-análisis. En este trabajo se utiliza como una aproximación para estas estimaciones de costos, un modelo general de equilibrio computable calibrado para México (Bravo, 2008 e Ibararán, 2008) y estimaciones que combinan un enfoque microeconómico y estructural para desarrollar una curva de costos de abatimiento (Quadri, 2008, Johnson *et al.*, 2009 y Molina, 2009). Estos resultados son sólo indicativos de las posibles opciones pero permiten identificar, para el caso mexicano, que existen alternativas tecnológicas accesibles y a costos que resultan atractivos desde el punto de vista de la política pública.

### CURVA DE COSTOS DE ABATIMIENTO SECTORIAL

La curva de costos de abatimiento puede desprenderse al asociar la evolución de las emisiones en México a sus fuentes económicas y posteriormente identificar las trayectorias sectoriales en el BAU, y por tanto sus emisiones esperadas, y los costos de reducción por tonelada de carbono por sectores. De este modo, las metas de reducciones posibles en toneladas de carbono que representan las cuñas (*wedges*) del escenario inercial se asocian a sus costos potenciales de acuerdo a los costos tecnológicos. Este procedimiento se basa entonces en asociar las emisiones a los sectores económicos correspondientes de acuerdo a la figura 19 y realizar las simulaciones apropiadas.

En este caso se imputa al consumo final el consumo de electricidad y, en todo caso se hacen simulaciones independientes del sector eléctrico. Las contribuciones sectoriales en las emisiones por sectores de actividad económica, permiten observar la relevancia del transporte, la industria, el cambio de uso de suelo y PEMEX lo que sugiere una correspondencia con los costos de mitigación.

Las reducciones por sectores incluyen dos escenarios: una reducción del 25% y otra del 50%. Así, el cuadro 122 presenta los requerimientos en las intensidades por una disminución de las emisiones de 50% al 2050 respecto a las emisiones del 2002. Ello significa pasar de 5.39 toneladas de CO<sub>2</sub> por persona a 2.27 toneladas de CO<sub>2</sub> por persona para el 2050. De igual manera debe disminuir la razón de intensidad de CO<sub>2</sub> a PIB y a energía. Este monto de reducción de emisiones por sectores bajo un ejercicio de reducción simétrica se presenta en el Cuadro 123. De este modo, es posible identificar las metas de emisiones *per cápita* a metas de emisiones sectoriales.

### CUADRO 122. REQUERIMIENTO DE CO<sub>2</sub>/PIB (TON DE CO<sub>2</sub>/MILES DE PESOS), CO<sub>2</sub>/POB (TON DE CO<sub>2</sub>/HABITANTE) Y CO<sub>2</sub>/ENERG (TON DE CO<sub>2</sub>/PETAJOULES) PARA REDUCIR AL 50% DE EMISIONES AL 2050

Ratio	2002	2010	2020	2030	2040	2050
CO <sub>2</sub> (1)/PIB	0.301	0.207	0.127	0.079	0.048	0.029
CO <sub>2</sub> (2)/PIB	0.342	0.235	0.145	0.089	0.054	0.033
CO <sub>2</sub> (1)/POB	4.759	4.018	3.271	2.722	2.305	2.003
CO <sub>2</sub> (2)/POB	5.399	4.558	3.711	3.088	2.615	2.272
CO <sub>2</sub> (1)/ENERG	71,858	50,021	32,741	21,302	13,002	7,936
CO <sub>2</sub> (2)/ENERG	81,520	56,748	37,144	24,167	14,751	9,003

Fuente: elaboración propia

## CUADRO 123. EMISIONES DEL 2002 Y METAS DE REDUCCIÓN DE EMISIONES DE 25% Y 50%, EN TONELADAS DE CO<sub>2</sub>

Sectores	Emisiones 2002	Emisiones a reducir con porcentajes de:	
		25%	50%
Transporte	111,959,959	27,993,558	55,981,724
Otras industrias	51,260,630	12,816,791	25,631,114
PEMEX	39,082,340	9,771,830	19,541,779
Residencial	22,542,217	5,636,273	11,271,460
Ganadería	38,527,550	9,633,115	19,264,375
Rellenos Sanitarios	36,036,860	9,010,364	18,018,992
Siderurgia	15,322,440	3,831,098	7,661,459
Aguas residuales	29,445,544	7,362,324	14,723,231
Cemento	12,619,445	3,155,263	6,309,919
Servicios	3,911,878	978,094	1,956,000
Química	1,126,000	281,536	563,018
Agricultura	7,618,540	1,904,878	3,809,389
Total	553,329,400	138,349,984	276,673,323

Fuente: Inventario Nacional de Gases Efecto Invernadero 1990-2002, (2006). INE, y elaboración propia

Estos requerimientos, en una reducción de 50% de emisiones, están por arriba de la trayectoria histórica promedio de desacoplamiento energético y de descarbonización de la economía mexicana (Cuadro 124). Sin embargo, es posible observar que para algunos años se han alcanzado estas tasas de desacoplamiento energético o de descarbonización. Ello sugiere, en todo caso, que es necesario instrumentar una acción coordinada y concertada entre el sector público y el privado para alcanzar estas metas de manera continua y que estas son factibles.

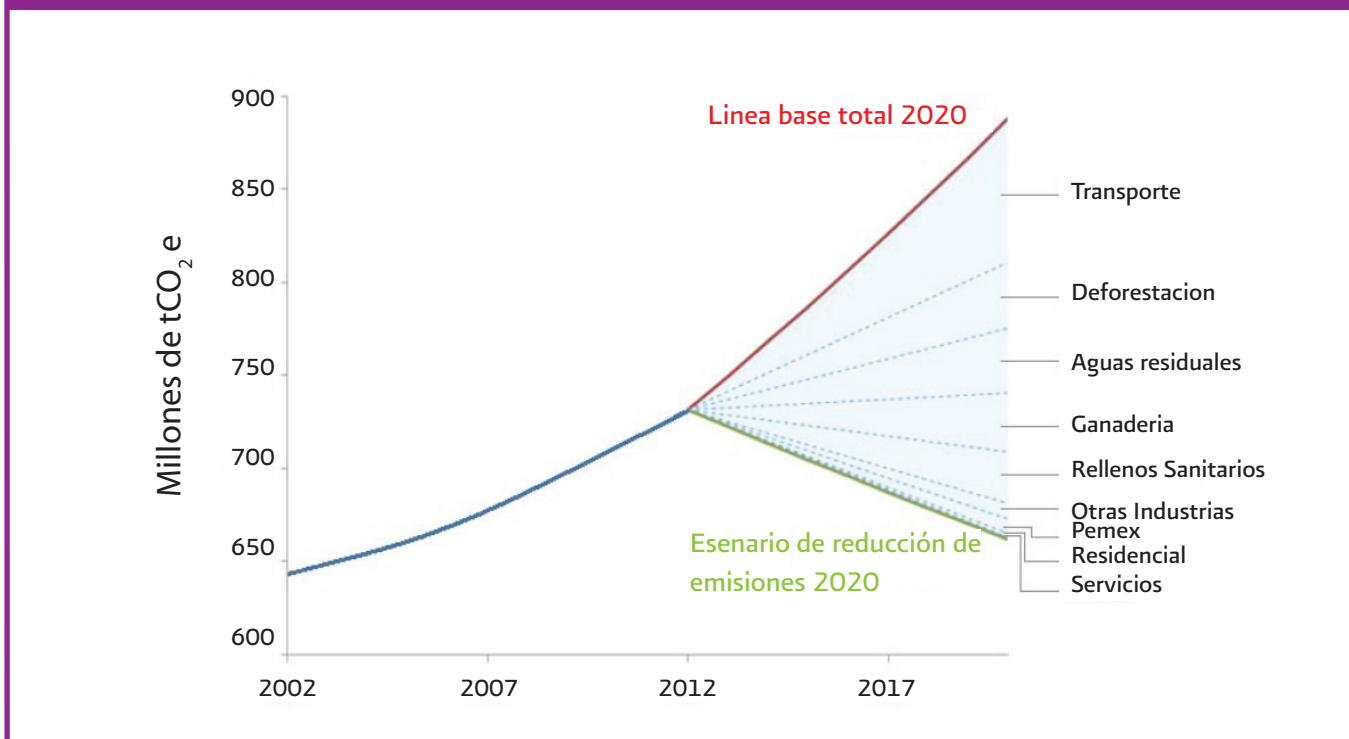
## CUADRO 124. TASA DE CAMBIO (%) ANUAL DE LOS REQUERIMIENTO DE CO<sub>2</sub>/PIB, CO<sub>2</sub>/POB Y CO<sub>2</sub>/ENERG PARA REDUCIR AL 50% DE EMISIONES AL 2050.

Ratio	2002-2010	2010-2020	2020-2030	2030-2040	2040-2050
CO <sub>2</sub> (1)/PIB	-4.57%	-4.77%	-4.64%	-4.86%	-4.91%
CO <sub>2</sub> (2)/PIB	-4.58%	-4.71%	-4.76%	-4.87%	-4.81%
CO <sub>2</sub> (1)/POB	-2.09%	-2.04%	-1.82%	-1.65%	-1.39%
CO <sub>2</sub> (2)/POB	-2.09%	-2.03%	-1.82%	-1.65%	-1.40%
CO <sub>2</sub> (1)/ENERG	-4.43%	-4.15%	-4.21%	-4.82%	-4.82%
CO <sub>2</sub> (2)/ENERG	-4.43%	-4.15%	-4.21%	-4.82%	-4.82%

### POTENCIAL DE REDUCCIÓN DE EMISIONES POR SECTORES

Las estimaciones de los potenciales de reducciones por sectores y los costos sectoriales de mitigación por tonelada de carbono realizadas por Quadri (2008), permiten identificar entonces las cuñas de mitigación que se presentan en la Gráfica 148 (Quadri, 2008), donde se deriva que la economía mexicana tiene la capacidad de estabilizar sus emisiones al 2020 en los niveles de 2002.

**Gráfica 148. Escenario 2020: Línea base y reducción de emisiones**



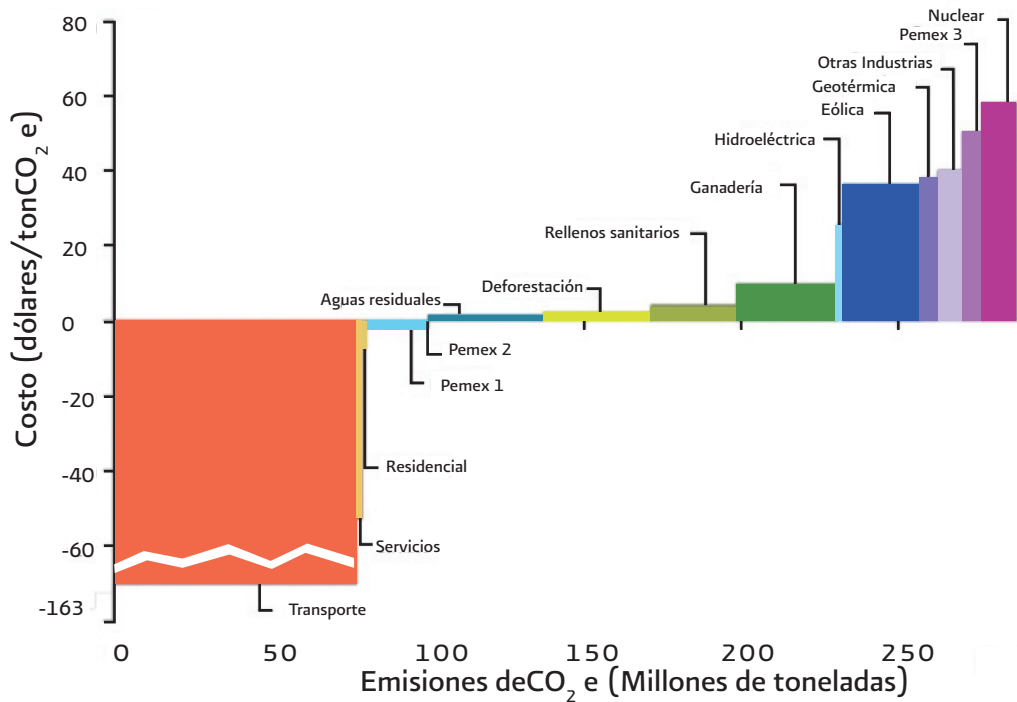
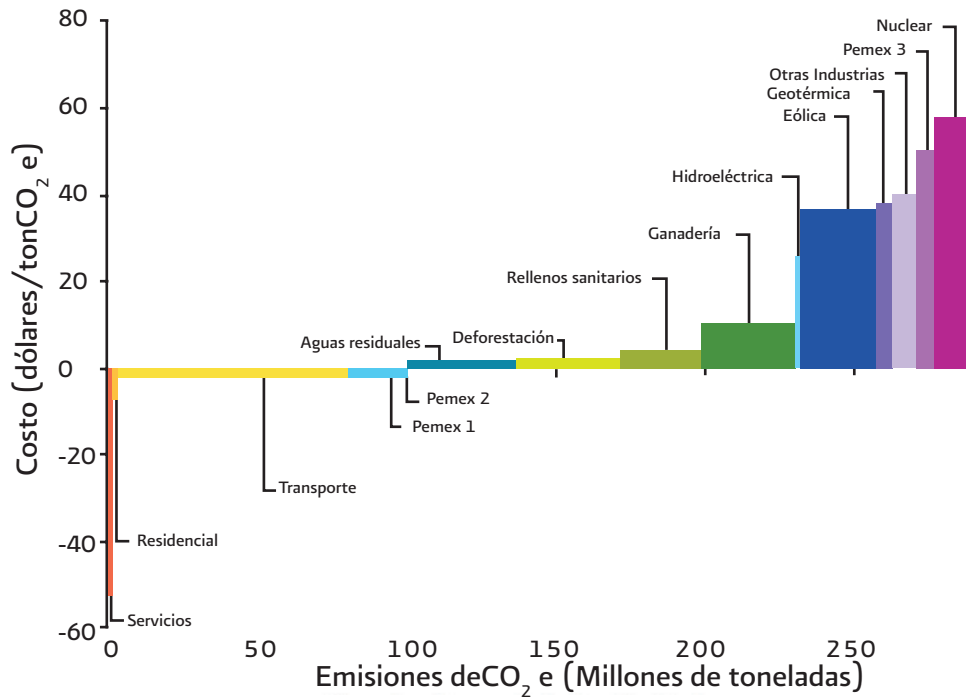
Estas opciones de mitigación se sintetizan en la Gráfica 149, donde la primera curva de abatimiento adopta un costo cero para el sector transporte y, la segunda incluye un costo cero de oportunidad fiscal de los subsidios de combustibles automotores.

### **COSTOS DE MITIGACIÓN**

De acuerdo al escenario BAU (E1) obtenido del modelo IPAT, las emisiones de CO<sub>2</sub> para el 2100 podrían encontrarse en niveles de 2,077 millones de toneladas, y para el 2050 en 1,045. De esta forma, una meta de reducción de 50% del nivel del 2002, corresponde a 276 millones de toneladas, que implica que se tendrían que reducir 1,801 millones de toneladas en todo el periodo. Los costos de reducción por tonelada de CO<sub>2</sub> de los sectores se promediaron (Cuadro 125), de esta forma el costo promedio de reducción es de 9.56 dólares por tonelada.



Gráfica 149. Curvas de costos marginales



## CUADRO 125. COSTOS DE MITIGACIÓN POR TONELADA DE CO<sub>2</sub> POR SECTORES

Sector	Costo por tonelada USD
Transporte	0.0
Otras industrias	40
PEMEX 1	0
Residencial	-7.2
Ganadería	10
Rellenos Sanitarios	4
Siderurgia	40
Aguas residuales	0.4
Cemento	40
Servicios	-52.5
Química	40
Agricultura	0
<b>Promedio</b>	<b>9.56</b>

Asumiendo una reducción de la misma magnitud anualmente y, suponiendo dos costos extremos de reducción por tonelada, se obtuvieron los costos de mitigación para el 2100 (Cuadro 126 y 127). De esta forma, para el objetivo de reducción de 50% de las emisiones de 2002 en el 2100, se tiene que estos costos se encuentran entre 0.70% y 2.21% del PIB (Cuadro 124). Cabe señalar, que este cálculo es indicativo y no representa las complejidades de las reducciones por sector.

## CUADRO 126. COSTO TOTAL DE LA REDUCCIÓN DE EMISIONES DE CO<sub>2</sub> PARA LA META DE 50% RESPECTO AL 2002 EN EL 2100

Costos	%PIB		
	0.5%	2%	4%
Precio 9.56	2.10	1.20	0.70
Precio 30	6.60	3.76	2.21

## CUADRO 127. COSTO TOTAL DE LA REDUCCIÓN DE EMISIONES DE CO<sub>2</sub> PARA LA META DE 50% RESPECTO AL 2002 EN EL 2050

Costos	%PIB		
	0.5%	2%	4%
Precio 9.56	1.03	0.77	0.56
Precio 30	3.24	2.43	1.75

El conjunto de resultados muestran que los costos totales para una reducción del 50% de las emisiones representan alrededor de 2% del PIB para el 2100, aunque con diferencias importantes por sectores. Esto es, los costos más importantes se ubican en el sector de industrias (manufacturas e industria de la construcción, en siderurgia y cemento). Cabe mencionar que el sector transporte es de los sectores que más emite CO<sub>2</sub>, pero el costo por tonelada es muy bajo o cero (Quadri, 2008), sugiriendo que existen oportunidades importantes en esta área.

## 7. ELEMENTOS PARA UNA ESTRATEGIA DE MITIGACIÓN EN MÉXICO

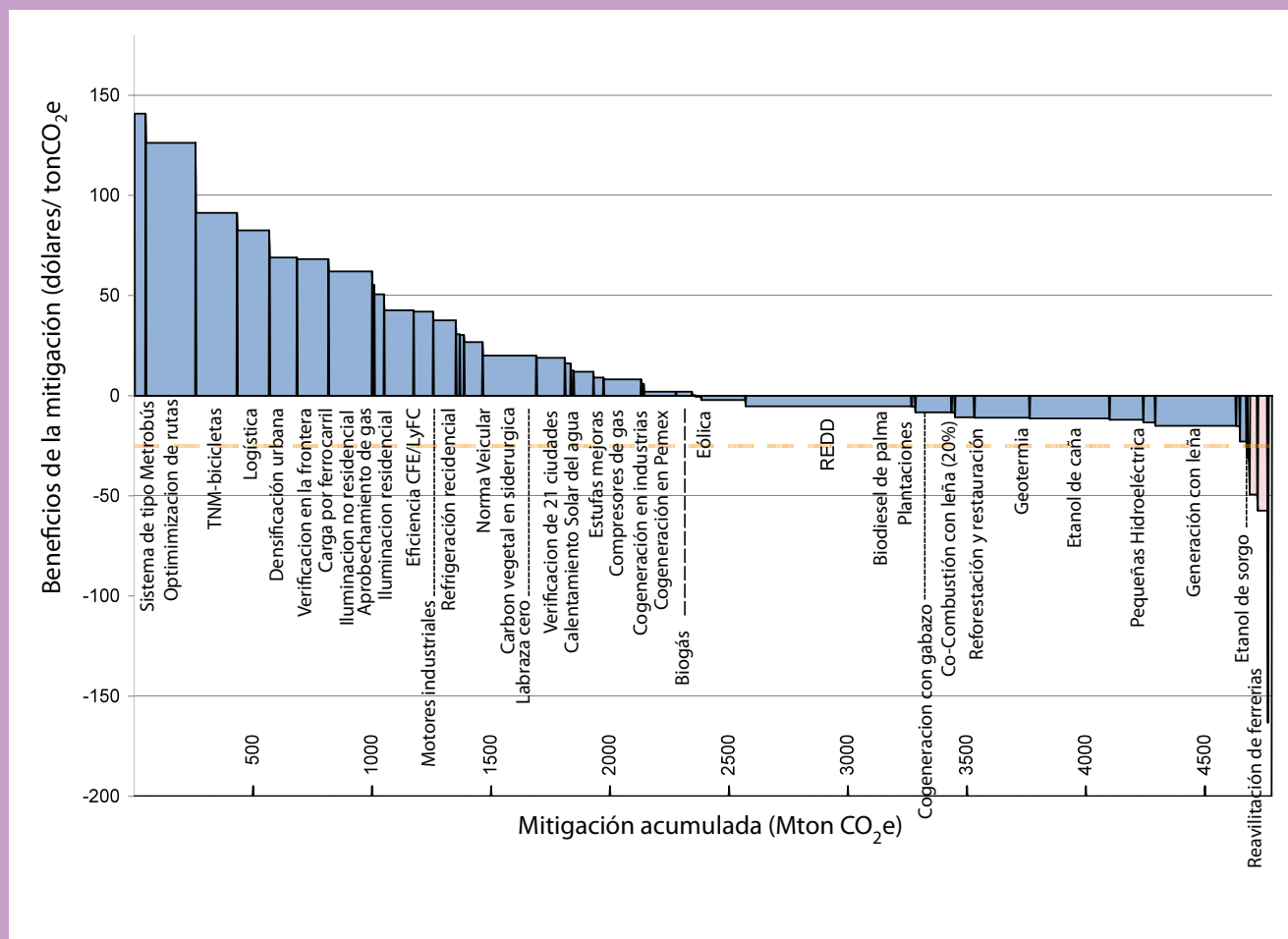
La construcción de una estrategia de mitigación requiere identificar la meta de emisiones por persona y transformar este compromiso en metas específicas cuantificables y, por tanto monitoreables para el conjunto de la economía y por sectores. En efecto, la identidad del IPAT permite entonces considerar metas específicas por sectores de emisiones. De este modo, es posible tener escenarios macroeconómicos y demográficos y construir los escenarios consistentes de desacoplamiento energético y de decarbonización que corresponden con una meta específica de emisiones *per cápita*. Desde luego, es posible identificar las condiciones por sectores y seleccionar aquellas que son costo efectivas y que se encuentran disponibles en el mercado. El monitoreo de las metas específicas por sectores requiere estudios a nivel sectorial que identifiquen las opciones tecnológicas y sus costos. La evidencia disponible para México sugiere que existen estas opciones de mitigación, tanto desde el punto de vista tecnológico como de costo efectividad. En efecto, los estudios por sectores con un componente más microeconómico y sus correspondientes curvas de costos de abatimiento por sectores, elaboradas por el Centro Mario Molina y el Banco Mundial (Johnson, 2009) permiten observar que existen alternativas viables. El conjunto de la información reportada en estos trabajos permite concluir al menos los siguientes puntos:

1. Las emisiones en México mantendrán un crecimiento acelerado en el escenario inercial o de *business as usual* lo que resulta insostenible en el largo plazo. Este ritmo de crecimiento es distinto por sectores.
2. El conjunto de los estudios muestran que existen alternativas viables y costo efectivo para instrumentar una estrategia de mitigación razonable y, que conduzca a la economía mexicana a una trayectoria baja en carbono. No obstante ello, alcanzar esta trayectoria requiere de ajustes significativos en la economía.
3. Las diferencias sectoriales, tanto en ritmos de crecimiento como en costos de abatimiento son significativas. Esto es, cada sector muestra diferentes opciones tecnológicas con diferentes costos, lo que supone la posibilidad de crear un mercado de emisiones entre sectores. Asimismo, indica la necesidad de mantener un monitoreo por sectores sobre su evolución, en términos de emisiones y el cumplimiento de las metas propuestas y de alternativas tecnológicas.
4. El conjunto de resultados apuntan hacia varios sectores donde las ganancias pueden ser significativas, más allá de diferencias puntuales en algunos de los costos. Más aun se observa que existen varias medidas que pueden instrumentarse en lo inmediato y donde las ganancias son directas. Existen además medidas específicas mencionadas que pueden instrumentarse en el mediano y largo plazo y que tendrían consecuencias positivas adicionales. De este modo, estos estudios identifican opciones evidentes de mitigación, en donde destacan en general medidas asociadas a la generación de energía, el transporte y algunas otras actividades económicas donde el uso de los recursos no es eficiente.

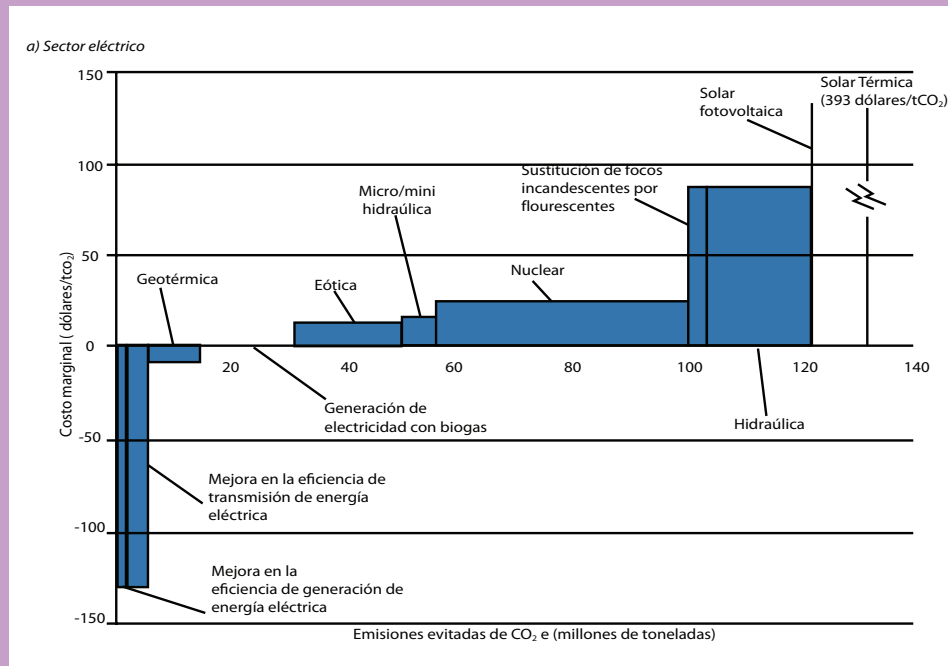
### Curva de costos de abatimiento y beneficios de mitigación

El Centro Mario Molina (CMM) y Johnston, Alatorre, Romo y Liu (2009) (Banco Mundial) estimaron diversas curvas de costos de abatimiento que muestran claramente los beneficios de los procesos de mitigación. En efecto, esta curva muestra en el eje vertical los beneficios netos en (US\$/t CO<sub>2</sub>e) o los costos netos y en el eje horizontal las emisiones abatidas para el periodo considerado (Mt CO<sub>2</sub>e). El potencial de abatimiento de cada medida depende de la amplitud de la barra y el beneficio neto de la reducción de emisiones en el eje vertical.

### Curva de costos de abatimiento

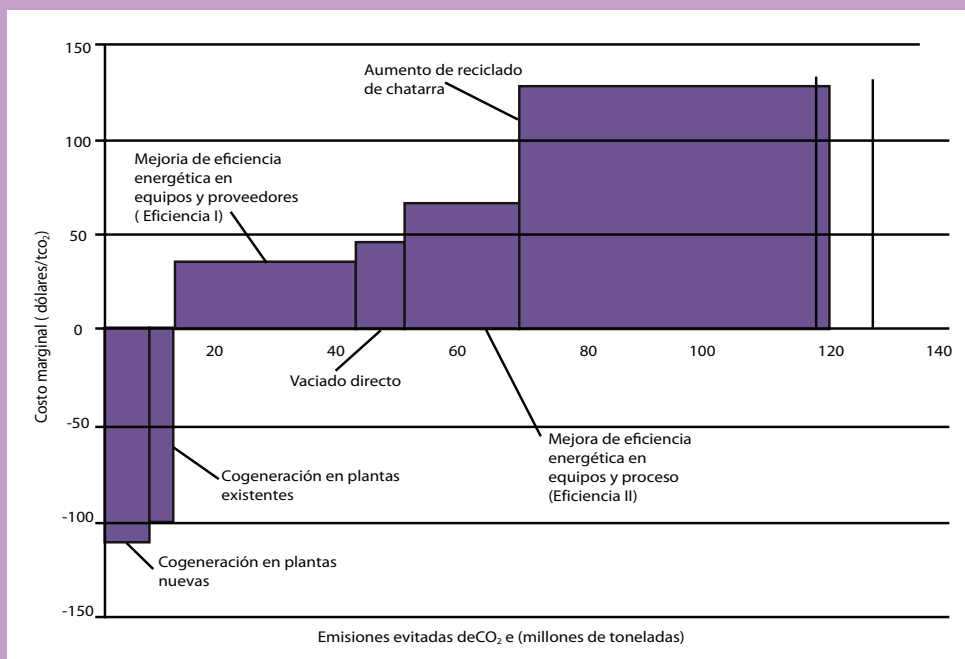


### Curvas de costo marginal de abatimiento del sector eléctrico en el Escenario de Mitigación, 2030



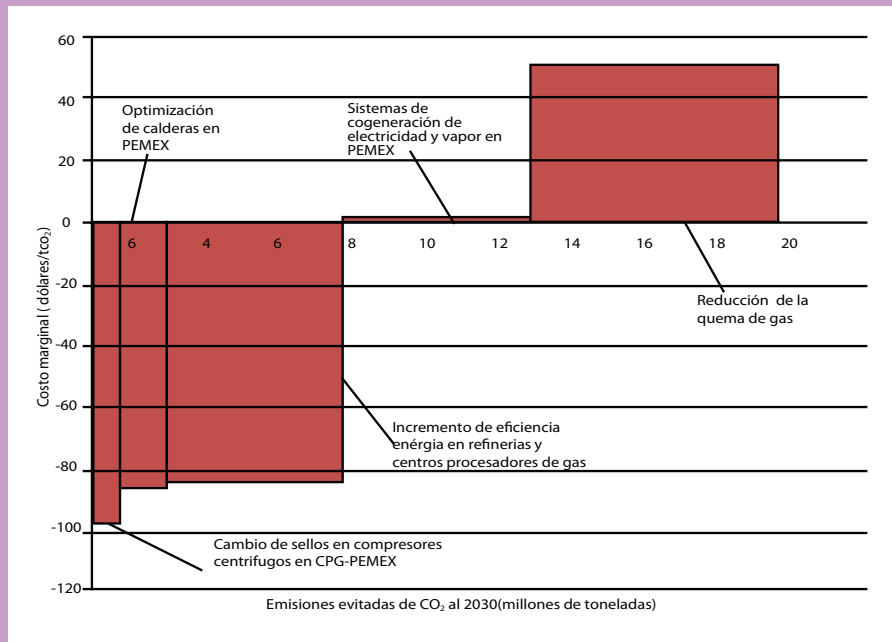
Fuente: CMM, 2008

### Curvas de costo marginal de abatimiento del sector siderúrgico en el Escenario de Mitigación, 2030



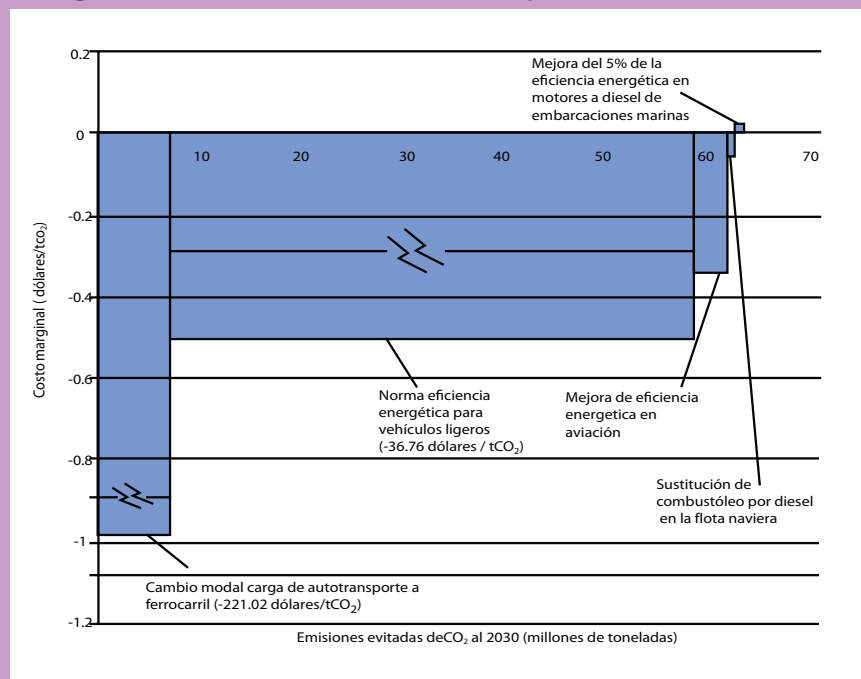
Fuente: CMM, 2009

### Curvas de costo marginal de abatimiento del sector petróleo y gas en el Escenario de Mitigación, 2030



Fuente: CMM, 2008

### Curvas de costo marginal de abatimiento del sector transporte en el Escenario de Mitigación, 2030



Fuente: CMM, 2009

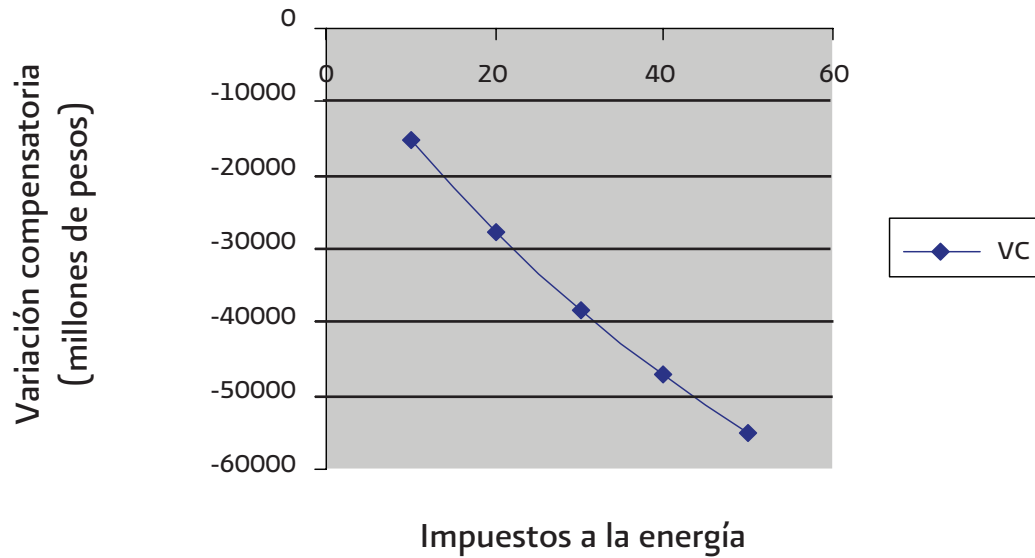
5. Los estudios muestran aun diferencias en la estimación y el ordenamiento de algunas de las medidas a instrumentar lo que mantiene cierto nivel de incertidumbre. Estas diferencias pueden asociarse a la aplicación de diversos supuestos sobre las tecnologías disponibles, diferentes estructuras de precios relativos, diferentes dotaciones iniciales de factores o incluso distintas tasas de descuento. Estos factores se modificarán para acceder a una senda de desarrollo sustentable, por lo que la curva de costos de abatimiento es endógena a las condiciones y por tanto se modificará en el tiempo.
6. Los escenarios presentados, incluyendo opciones de política pública, sugieren que existe una alta posibilidad de continuar por una senda alta en emisiones de carbono bajo las circunstancias actuales. Ello es posible por ejemplo, en la opción de utilizar al carbón para la generación de energía o los límites potenciales de la producción de petróleo en México. Ello resulta desde luego preocupante y debe por tanto buscar compatibilizarse una estrategia de desarrollo sustentable con costos razonables y manejables.
7. Las estrategias de mitigación elaboradas muestran en detalle las opciones para varios sectores tales como los sectores eléctrico, transporte, petróleo y gas, papel, azúcar y cemento. En los documentos se incluyen además propuestas específicas para mitigar. Más aun, se observa que buena parte de las medidas propuestas tienen beneficios netos.

## 8. MODELO DE EQUILIBRIO GENERAL COMPUTABLE

Los impactos económicos que se producen al aplicar un impuesto a la demanda de energía, se pueden analizar con un modelo de equilibrio general computable (GEM) que se construyó bajo los supuestos Arrow-Debreu (A-D). Ello permite estimar los costos de aplicar una política pública específica. En el contexto del proyecto la economía del cambio climático, se contruyó un modelo de equilibrio general computable (Bravo, 2008) y se realizaron simulaciones con otro modelo (Ibarrarán, 2008). Así, los resultados más significativos al gravarse simultáneamente todos los sectores energéticos en estos GEM indican que:

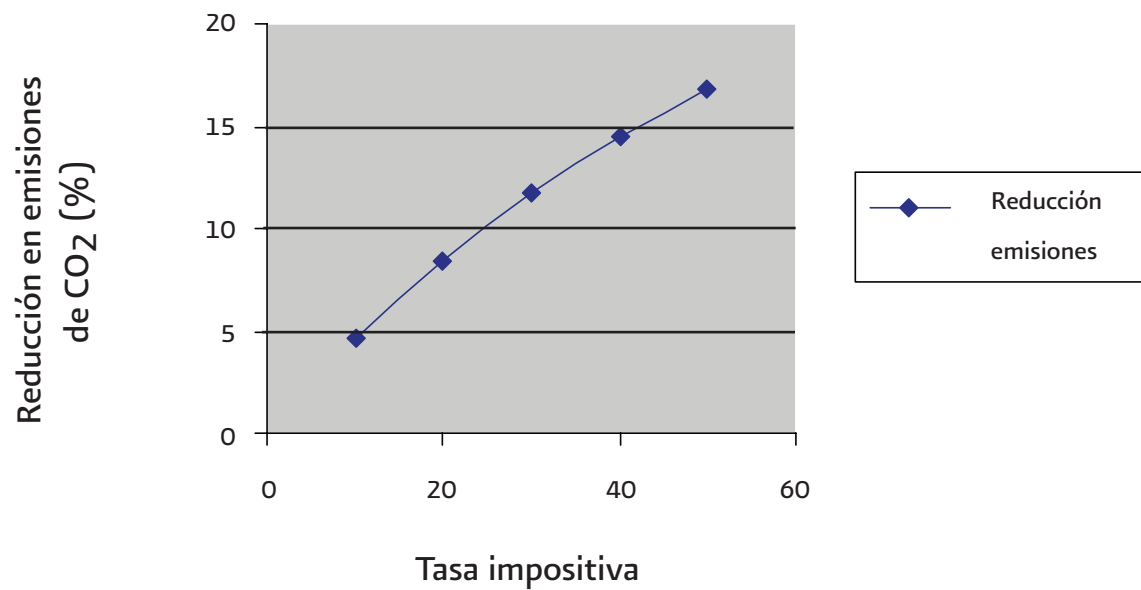
1. **Modificación en precios relativos.** La aplicación de un impuesto ocasiona cambios en los precios relativos por sectores. Ello lleva a modificaciones en las dinámicas sectoriales que se traduce en los costos de la estrategia impositiva.
2. **Efectos en la variación compensatoria (VC).** La VC mide la compensación necesaria para que el consumidor representativo en la economía no vea modificado su nivel de bienestar ante una modificación en los precios relativos. En el caso en que la VC es negativa, entonces la política aplicada es perjudicial para el consumidor y, se debería compensar en su ingreso con la magnitud de la VC, en valor absoluto, para alcanzar el mismo nivel de utilidad que tenía antes de la aplicación de la política. En el caso en que la VC es positiva, entonces se le deberá reducir el ingreso al consumidor para que alcance el mismo nivel de utilidad que antes de la aplicación de la política. La Gráfica 150 muestra los resultados de las simulaciones en relación a los cálculos de la VC. Estas estimaciones indican que una política impositiva tiene costos en dos vertientes: los costos en la reducción del PIB y los costos en el bienestar del consumidor como consecuencia del aumento de precio relativos.

Gráfica 150. Variación compensatoria



3. Reducción de emisiones. Como consecuencia de la modificación en los precios relativos, se modifican la demanda de energía y por ende la emisión de  $\text{CO}_2$  a la atmósfera. Asimismo, al gravarse simultáneamente todos los sectores energéticos se obtienen reducciones significativas en las emisiones de  $\text{CO}_2$  que aparecen en la Gráfica 151.

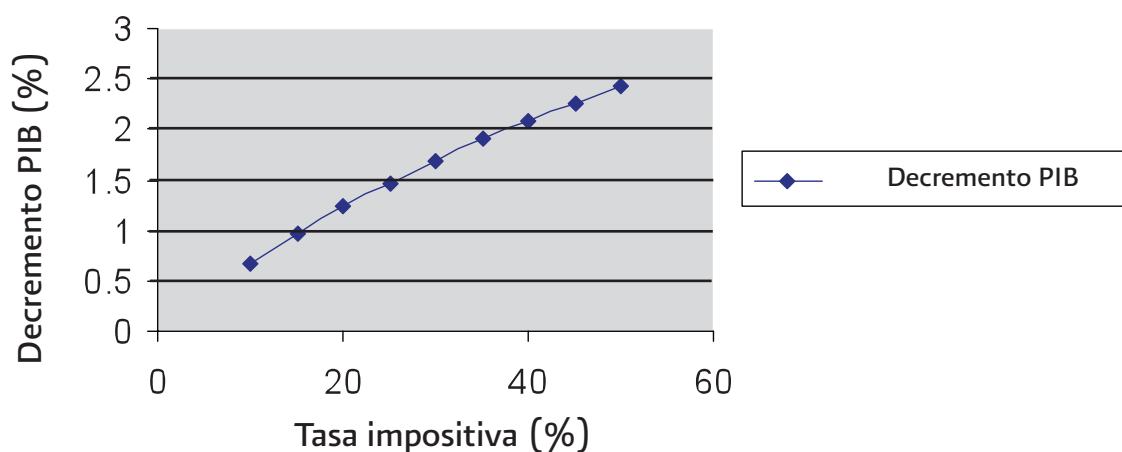
Gráfica 151. Reducción de emisiones  $\text{CO}_2$





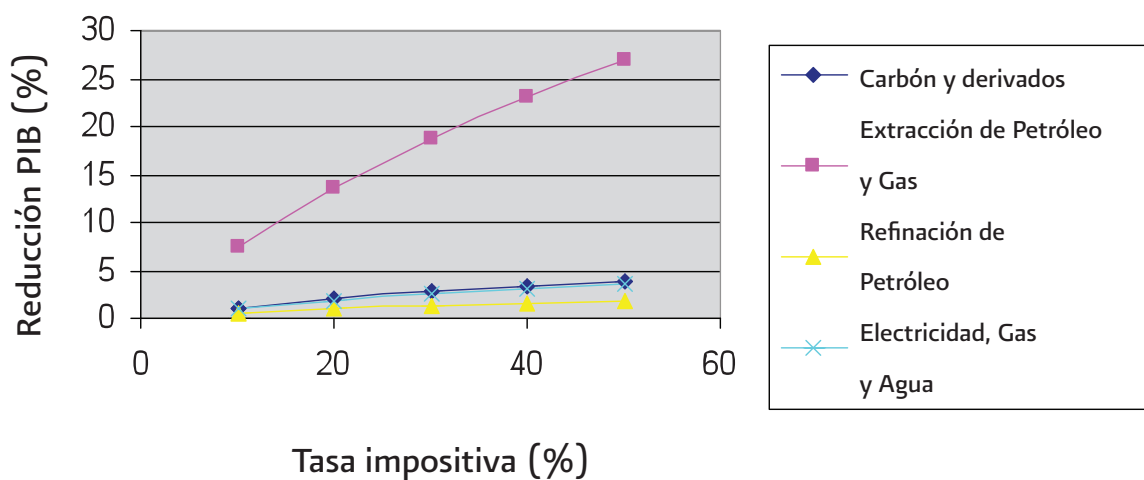
4. Decremento en el PIB. La introducción de un impuesto con el objetivo de reducir las emisiones tiene como consecuencia una reducción en la producción total de la economía, ya que al disminuir la demanda de energía se reducen también las posibilidades de producción. La gráfica 152 muestran los resultados que confirman este comportamiento. Estas reducciones se asocian entonces a los costos de aplicar una estrategia de mitigación. Así, los costos estimados de aplicar una tasa impositiva *ad valorem* de entre 10 a 50% en los precios de todos los energéticos, oscilan entre 0.7 y 2.5% del PIB.

Gráfica 152. Decremento del PIB como Consecuencia del Impuesto a la energía

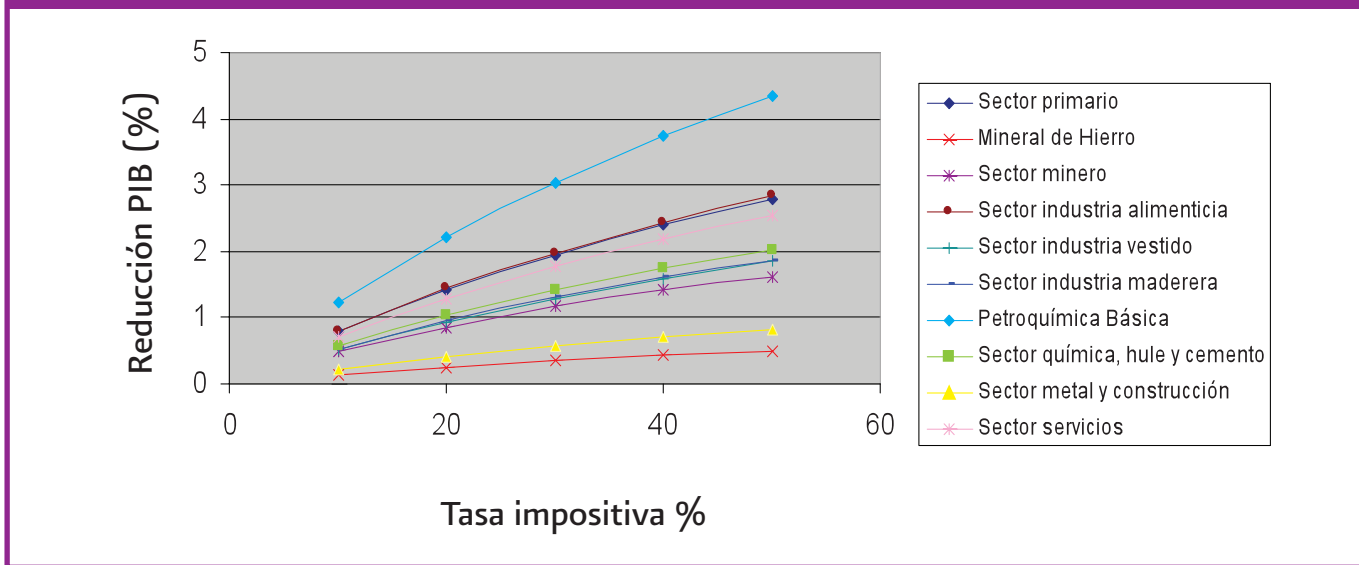


El decremento en el PIB generado por el encarecimiento de la energía en la economía, no es uniforme. Esto puede observarse al separar los efectos en la reducción del PIB por sectores, entre sectores energéticos y no energéticos (Gráfica 153 y 154).

Gráfica 153. Reducción del PIB (Sectores energéticos)



Gráfica 154. Reducción del PIB ( Sectores no energéticos)



## 9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A nivel global existen distintas estrategias posibles de mitigación que tienen desde luego distintos costos asociados. En principio, la estrategia más probable sugiere buscar estabilizar por debajo de 550 (mejor entre 450 y 500 ppm), lo que implica que las emisiones alcancen un nivel máximo dentro de 10 o 20 años y, que luego se reduzcan a una tasa de entre 2 a 3 o incluso 4% anual, de modo que se llegue a una meta de entre 25 y 50% debajo de los niveles de emisiones actuales para el 2050. Estabilizar entre 450 a 500 ppm representa entre 2 y 3 toneladas per cápita de emisiones. Estabilizar en valores cercanos a 550 ppm resulta peligroso, atendiendo a la posibilidad de eventos extremos. Debe además considerarse, que retrasar 10 años más una estrategia de mitigación implica un aumento de entre 0.2 y 0.3 grados de temperatura en un horizonte de 100 a 400 años (Meinshausen (2006)) y que, de hecho, la inacción en los próximos 10 a 15 años hace casi imposible evitar un aumento de 2 grados de temperatura sobre los niveles preindustrial (IPCC, 2007).

En este sentido, la estrategia sugerida debe concentrarse en estabilizar en un rango entre 450 y 550 ppm. Ello supone, por ejemplo, que las tasas históricas internacionales de descarbonización que se ubican en valores de 0.3 por ciento anual aumenten a tasas de, al menos, 0.6 o 0.9% (IPCC, 2007) o más para alcanzar una meta de 450 ppm. Las simulaciones realizadas sugieren que esas tasas son factibles para la economía mexicana a costos aproximados a 2% del PIB, en la mayoría de los escenarios con tasa de descuento el 4%. Estos valores son substancialmente menores a los costos de los impactos negativos estimados del cambio climático. Debe sin embargo considerarse que, tanto los costos de la mitigación como los impactos del cambio climático son no lineales (De Miguel, 2006), por lo que retrasar un acuerdo internacional puede tener consecuencias negativas inesperadas y graves. Asimismo, debe considerarse que existen costos irreversibles como, por ejemplo, en biodiversidad que deben evitarse. En este sentido, México puede beneficiarse de una acción concertada internacional que le otorgue además recursos frescos para financiar una transición energética menos intensiva en carbono.

1. Existen tendencias y patrones regulares de comportamiento entre las emisiones de gases y el consumo de energía y, de emisiones de gases y producto, población y producto *per cápita*. A este respecto se observa que en general existen, por un lado, tendencias a aumentar las emisiones asociadas a las trayectorias de la población y el producto y, otras tendencias a disminuir la intensidad energética y las emisiones GEI por unidad de energía o de producto. En este sentido, el pronóstico de las emisiones GEI depende crucialmente de los supuestos de desacoplamiento energético y de descarbonización y por tanto del proceso de difusión tecnológica. En todo caso, los resultados de estas proyecciones indican que las emisiones en México tenderán a aumentar en los próximos años de no instrumentarse políticas significativas, más allá de las políticas de precios, para desacoplar las emisiones al consumo de energía o del producto o producto *per cápita*. En este sentido, es necesario considerar como un factor fundamental a la innovación tecnológica.
2. El conjunto de simulaciones muestra que las trayectorias de emisiones en México en el BAU, son insostenibles con un acuerdo internacional de mitigación. Sin embargo, las trayectorias de los procesos actuales de desacoplamiento energético y de descarbonización muestran que es posible con ajustes significativos, transitar a una trayectoria de crecimiento con baja intensidad en carbono. Ello puede hacerse sin dañar fundamentalmente el ritmo de crecimiento económico y garantizando el abastecimiento de energía, pero modificando activamente el vector de precios relativos.
3. En este contexto, se observa que las políticas públicas deben contribuir a reducir los coeficientes de energía a producto y de emisiones a energía, a través de la aplicación de políticas de precios, regulaciones e incentivos a la innovación y difusión tecnológica. Así, es necesario imponer metas a nivel nacional y por sectores de desacoplamiento energético y de descarbonización, pero dejando libre las opciones tecnológicas y sólo mostrando un abanico de opciones de tecnologías disponibles. Debe considerarse entonces que existen diversas estrategias y acciones de política para reducir las emisiones, en donde destacan:
  - a) Reducción de la demanda de bienes intensivos en carbono.
  - b) Modificar la matriz energética, transitando a una senda baja en carbono y mejorando la eficiencia de la generación de energía, incluyendo a PEMEX y CFE.
  - c) Aplicar medidas para hacer más eficiente el transporte y reducir sus emisiones.
  - d) Reducir emisiones agrícolas.
  - e) Reducir emisiones fugitivas y control de emisiones de metano en los desechos.
  - f) Control y reducción de emisiones en la industria.
  - g) Control de la deforestación.

Una desagregación de estas acciones se presenta en el Cuadro 128.

## CUADRO 128. ACCIONES APLICABLES

Sectores	Instrumentos de política no climática	Instrumentos de políticas aplicables			
		Sistema de precios	Regulación	Contratos	Presupuestos del Estado
Transporte	Mejorar los términos de productos ecológicos	Eliminación de subsidios y <i>carbón tax</i>	Emisiones de CO <sub>2</sub> /km		
Residencial y servicios		Eliminación de subsidios	Eficiencia energética		
Pemex 1 y 2	Diversificar importaciones, reducir la intensidad de la energía a, mejorar la seguridad energética		Emisiones fugitivas de metano		
Aguas Residuales			Gestión de metano y biodigestión de lodos		Financiamiento Banobras
Deforestación	Adopción de protección de bosques y prácticas de administración sostenibles		ANP	PSA, compras de tierras, servidumbres	ANP, PSA, compras y servidumbres
Rellenos Sanitarios			Aplicación de NOM 083, régimen de fomento para electricidad renovable		Financiamiento Banobras
Ganadería			NOM 001 y metano		Financiamiento Financiera Rural
Generación de electricidad renovable	Programas de administración del lado de la demanda, adopción de costo-efectivo renovable, y reducción de transmisión y distribución de pérdidas		Apertura para un mercado, facilidad de interconexión, régimen especial de fomento, portafolio estándar		Tarifas preferenciales, créditos fiscales
Pemex 3					Financiamiento a proyectos
Industria			Normas de eficiencia energética		Créditos fiscales
Nuclear					Financiamiento a proyectos
Política Macroeconómica	Implementar impuestos no climáticos, subsidios, u otras políticas fiscales y regulatorias que promuevan el desarrollo sustentable				

Fuente: Quadri (2008) e IPCC (2007)

4. Los costos de estos procesos de mitigación oscilan de manera importante. En efecto, las curvas de abatimiento difieren substancialmente por país, a consecuencia de distintas intensidades energéticas, precios relativos, disponibilidad de recursos entre otros factores. Destaca además que existen diferencias en estas curvas incluso en el mismo país. Ello se refleja en un grado de incertidumbre importante que es necesario aún reducir para propósitos de política pública.
5. Los costos estimados de mitigación para la meta de reducción de 50% del 2002 al 2100 se ubican entre 0.70 y 2.21% del PIB, con tasa de descuento del 4% y aplicando entre 10 y 30 dólares de costo de la tonelada de carbono. Estos costos pueden estar en el límite superior atendiendo a varias consideraciones:
  - a) El desarrollo de nuevas tecnologías que en el futuro disminuirán los costos de mitigación.
  - b) Se aplicó un supuesto de reducciones uniforme en toda la economía, por lo que no se incorpora una trayectoria óptima que reduzca los costos por sectores. Esto es, que aproveche los diferenciales de costos sectoriales para disminuir los costos agregados.

En este sentido, una estrategia de optimización de costos contribuirá a reducir este monto substancialmente. Ello sugiere la relevancia de construir una instancia institucional de cambio climático en el país que contribuya a este logro.

## RECOMENDACIONES

- a. Debe diseñarse una estrategia de cambio climático en México que atendiendo a las diversas opciones de mitigación y ponderando sus costos y beneficios y que establezca claramente las metas de mitigación.
- b. Las metas de mitigación deben de estar acompañadas por metas específicas para la economía nacional y por sectores.
- c. Debe construirse una institucionalidad adecuada sobre cambio climático que apoye y de seguimiento a las medidas instrumentadas y, que permita obtener las reducciones establecidas de emisiones. Ello puede significar un ahorro económico sustantivo.



## PARTE 5: CAMBIO CLIMÁTICO Y POLÍTICAS PÚBLICAS EN MÉXICO

### 5.1 VALORACIÓN ECONÓMICA DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN MÉXICO

#### Puntos fundamentales

Las estimaciones de costos y beneficios presentados en este apartado son desde luego solo indicativos. Esto es, la construcción de escenarios a 100 años plazo es, desde luego, bastante incierto y en todo caso sólo sugieren posibles trayectorias. No obstante ello, es posible identificar varias tendencias importantes que es necesario considerar:

1. Los costos del cambio climático son heterogéneos, no lineales y crecientes en el tiempo. Así, se observa que un ligero aumento de temperatura puede ser incluso benéfico en algunas regiones del país. Sin embargo, el aumento continuo de la temperatura tiene efectos negativos crecientes en el conjunto de las actividades económicas. Más aun, existen límites irreversibles donde los costos aumentan más que proporcionalmente. Además, los riesgos de daños muy elevados asociados a eventos extremos aumenta con el tiempo. En este sentido, es necesario no sólo considerar los costos y beneficios del cambio climático directamente sino también considerar “la compra de un seguro ante la posibilidad de cambios o impactos drásticos”.
2. Los resultados presentados en este apartado indican que los costos y los beneficios asociados al cambio climático son ciertamente elevados para México. En ambos casos los costos son superiores a aquellos que generalmente se estiman en países desarrollados. Sin embargo, los costos asociados a los impactos resultan superiores a los costos de mitigación y además existen costos fuera del mercado que son inadmisibles como la pérdida irreversible de biodiversidad. Desde luego que ello para un país no implica necesariamente la decisión de una acción unilateral de mitigación pero plantea la conveniencia de apoyar la construcción de un acuerdo internacional al respecto.
3. En todo caso, es posible y necesario limitar los impactos del cambio climático y evitar los impactos exponenciales futuros. En este sentido, es fundamental mantener un crecimiento continuo y elevado ya que ello permite reducir los impactos climáticos y facilita la adaptación, asimismo, con un mayor nivel de ingreso los riesgos de los eventos extremos se pondera de manera distinta (Nordhaus, 2008).

## 1. INTRODUCCIÓN

Los impactos económicos del cambio climático sobre la economía mexicana son ciertamente significativos. Sin embargo, su cuantificación es una tarea compleja ya que requiere combinar modelos científicos y económicos de forma consistente, generar escenarios económicos en un horizonte de tiempo muy amplio<sup>77</sup> y reconocer, por tanto, la existencia de un margen de incertidumbre importante en los resultados obtenidos y la presencia de riesgos significativos que resultan particularmente difíciles de evaluar tales como la irreversibilidad de la pérdida de especies o la posible ocurrencia de eventos catastróficos; además es necesario considerar factores que no tienen un valor de mercado pero que resultan fundamentales tales como pérdida de biodiversidad o impactos en salud.

No obstante ello, desde la óptica de la política pública y de la sociedad en general, resulta un ejercicio particularmente útil cuantificar los costos del cambio climático en la medida en que ello permite identificar opciones y alternativas y construir estrategias de desarrollo lo más eficientes posibles para enfrentar los desafíos del cambio climático. En este contexto, resulta importante proteger para las generaciones futuras nuestros recursos naturales y proteger al conjunto de las actividades económicas más allá de su valor económico. En este sentido, este capítulo tiene como objetivo sintetizar la evaluación de los costos y beneficios del cambio climático en México.

<sup>77</sup> El escenario base no debe tomarse como una proyección. Shelling (1992, en Frankhause, 1995) argumenta que sería muy difícil predecir a principios del siglo XX el uso de aviones y de otros aparatos electrónicos.

## EL CONTEXTO GENERAL

Los escenarios que permiten evaluar los impactos económicos del cambio climático dependen, fundamentalmente, de las proyecciones del aumento de la temperatura, y el resto de las variables climáticas, asociado al incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero. Estas proyecciones se sintetizan en el Cuadro 129 (Stern ,2007).

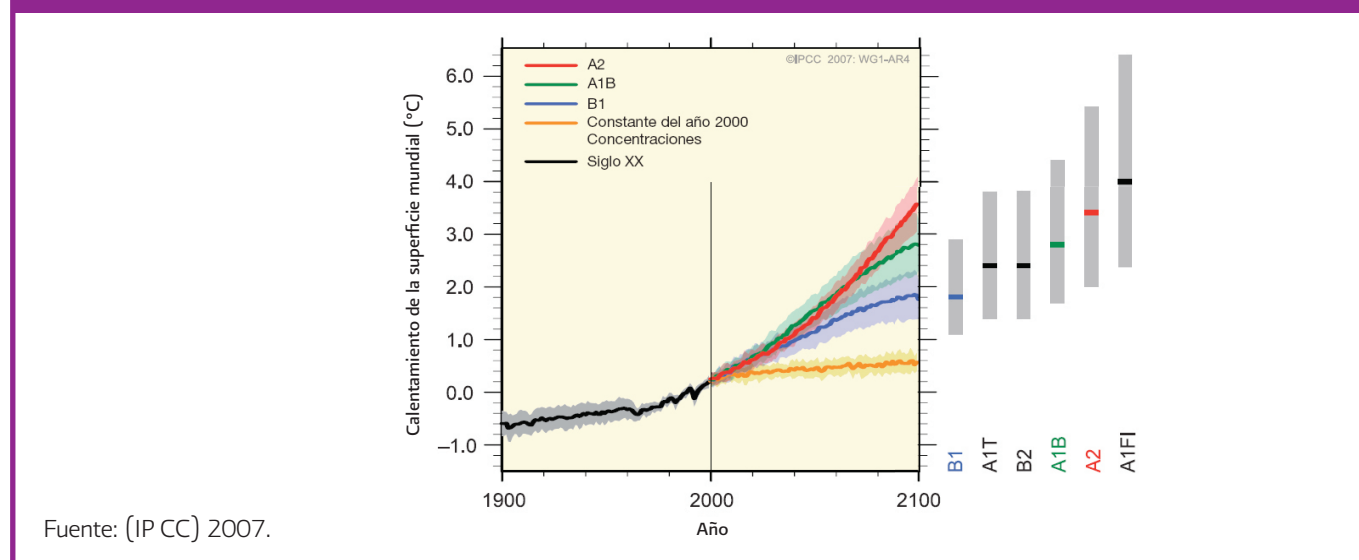
### CUADRO 129. CONCENTRACIONES DE GEI Y TEMPERATURA MEDIAS CON RESPETO A LOS NIVELES PREVIOS A LA REVOLUCIÓN INDUSTRIAL

Nivel de Estabilización (ppm CO <sub>2</sub> equivalente)	Incremento de Temperatura al Equilibrio Relativo		
	IPCC TAR 2001 (Wigley y Raper)	Hadley Centre Ensemble	Once Estudios
400	0.8 – 2.4	1.3 – 2.8	0.6 – 4.9
450	1.0 – 3.1	1.7 – 3.7	0.8 – 4.9
500	1.3 – 3.8	2.0 – 4.5	1.0 – 7.9
550	1.5 – 4.4	2.4 – 5.3	1.2 – 9.1
650	1.8 – 5.5	2.9 – 6.6	1.5 – 11.4
750	2.2 – 6.4	3.4 – 7.7	1.7 – 13.3
1000	2.8 – 8.3	4.4 – 9.9	2.2 – 17.1

Fuente: Stern (2007)

Esta información permite observar que existe un nivel de incertidumbre importante en las proyecciones. Así, por ejemplo, la Gráfica 155 muestra que los aumentos más probables esperados en la temperatura promedio durante el siglo XXI oscilan entre 1 y 6 grados, y que además doblar las concentraciones de GEI conduce a aumentos en la temperatura de entre 1.5 a un poco más de 6 grados centígrados (Hanley y Spash, 1993). Asimismo, existe un nivel de incertidumbre importante en las proyecciones de los cambios en los patrones de precipitación y sobre los cambios en la frecuencia e intensidad de los eventos extremos.

Gráfica 155. Proyecciones de la temperatura para el siglo XXI





De este modo, los valores estimados en el análisis de costo beneficio (ACB) deben de tomarse con extrema precaución y representa sólo un rango de valores indicativos. Las valoraciones económicas de los costos y beneficios del cambio climático a nivel internacional es un área de intenso debate. En efecto, la evidencia disponible (por ejemplo, Nordhaus y Boyer, 2000 Nordhaus, 2008, Fankhauser, 1995, Mendelsohn, 2002) muestran una gran diversidad de resultados como consecuencia del uso de metodologías distintas, de proyecciones climáticas diferentes, de supuestos también diferenciados y de incluir en la valoración distintos ámbitos, sectores, regiones o países. En efecto, se observa que la realización de una valoración económica comprehensiva de los impactos del cambio climático sobre una economía en particular, plantea retos y tiene características específicas que es necesario considerar y en donde destacan:

1. **Metodología general o específica.** La valoración económica de una región o de un país tiene desde el punto de vista metodológico retos diferentes a una evaluación global. Esto es, en una valoración de un país específico no existe una relación directa entre la mitigación y los impactos climáticos. Asimismo, no existe una asociación directa entre los impactos en sectores específicos y el bienestar de la población. Por ejemplo, una reducción de la oferta de alimentos puede compensarse en un país específico con las importaciones, pero no puede argumentarse lo mismo a nivel global. Asimismo, la valoración global puede poner un énfasis directo en las poblaciones en riesgo en vez de los costos asociados directamente a las actividades económicas. Además, la valoración económica global no incluye necesariamente a todos los aspectos de una economía y se concentra en algunos sectores o regiones. Por ejemplo, los costos considerados en el informe Stern (2007) incluye fundamentalmente agua, comida, salud, suelo, ecosistemas y cambios abruptos. Sin embargo, en un país específico pueden identificarse otros costos que resultan relevantes dependiendo de las características específicas de cada economía y, al mismo tiempo se rompe la causalidad directa entre producción de alimentos y escasez de alimentos.
2. **Selección de modelos económicos de análisis.** El análisis de los costos económicos del cambio climático puede realizarse con base a diversos modelos económicos que incluyen, entre otros:

- Modelos experimentales.
- Modelos econométricos multi o uni-ecuacionales: funciones de producción, modelos de oferta y demanda, modelos Ricardianos.
- Modelos de equilibrio general computable.
- Modelos *ad hoc*.

Cada uno de estos modelos tiene, desde luego, diversas características, conduce a distintos resultados y se utilizan para distintos propósitos. Por ejemplo, los modelos de equilibrio general computable son comúnmente aplicados a identificar los cambios en el bienestar o una curva de costos ante diversos procesos de mitigación, mientras que los modelos econométricos muestran una mayor flexibilidad en las estimaciones económicas sectoriales.

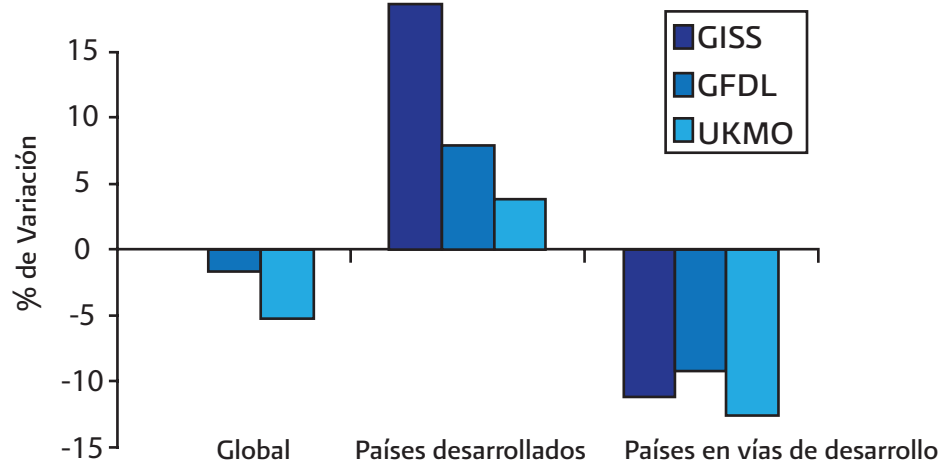
### **Críticas a los modelos Ricardianos**

Los modelos Ricardianos son utilizados para estimar los impactos climáticos en el sector agrícola. Sin embargo, estos modelos son criticados argumentando:

1. No se puede hacer una transferencia directa de un modelo basado en estimaciones de sección cruzada para proyectar la evolución histórica. Por ejemplo, los modelos de series de tiempo generan, normalmente, valores superiores de costos que los modelos Ricardianos.
2. Estos modelos están incorrectamente especificados ya que deben incluirse factores adicionales, tales como tipo de semillas o pendientes del suelo.
3. El supuesto de precios constante es irreal y lleva a subestimar costos y sobre estimar los beneficios.

3. **Análisis sectorial.** La selección de los sectores, asociada a la trayectoria climática, resulta fundamental en la medida en que los costos por sector son muy diferentes. Por ejemplo, la evidencia disponible muestra que en el sector agropecuario las temperaturas óptimas para la producción de cereales se ubican entre 25 y 30 grados centígrados y que 40 grados representa el límite superior (Stern, 2007). Así, el sector agrícola (una de las actividades más afectadas por el cambio climático), dependiendo de la región, muestra que sus rendimientos aumentan para los cereales (trigo y arroz) con un incremento de 2 o 3 grados y comienzan a reducirse con un aumento de entre 3 y 4 grados. Debe considerarse además que existen factores adicionales que inciden sobre el resultado neto final. Por ejemplo, los impactos de la temperatura de los rendimientos agrícolas dependen fundamentalmente del proceso de fertilización del CO<sub>2</sub> o de la disponibilidad de agua (Stern, 2007) o de condiciones climáticas específicas.
4. **Costos heterogéneos y convexos.** Los costos económicos son fuertemente diferenciados por regiones del mundo y por períodos de tiempo. Esto se muestra, por ejemplo, en la Gráfica 156 (Stern, 2007) donde un aumento de la temperatura terrestre puede tener beneficios económicos sustantivos en algunas regiones y en otras costos significativos. En este sentido la estimación de costos por país debe incorporar estas diferencias regionales. Por ejemplo, existen regiones que un aumento de 0.5 grados de temperatura puede ocasionar beneficios importantes en la agricultura o el agua (d'Arge, 1975). Asimismo, se observa que los costos del cambio climático son no-lineales y crecientes en el tiempo como lo muestran las formas funcionales establecidas en el informe Stern (2007).

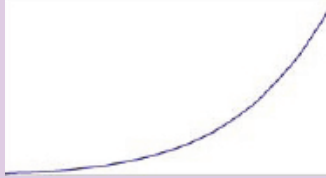

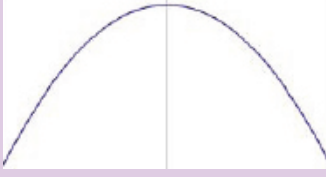
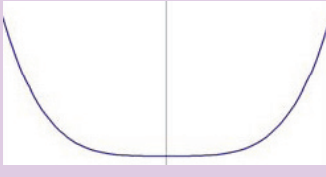
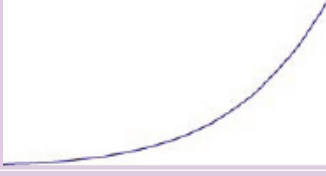

**Gráfica 156. Producción de cereales al doblar el CO<sub>2</sub> y 3 grados de temperatura**



Fuente: Stern, 2007

### Formas funcionales de costos del informe Stern

Las relaciones de costos que se establecen en el informe Stern pueden sintetizarse en las siguientes gráficas

Tipo de efecto	Sector (Ubicación de la fuente)	Forma funcional propuesta	Bases
Sistema climático	Agua	Exponencial $y = e^x$	 La ecuación Clausius-Clapeyron muestra que la capacidad de retención de agua del aire aumenta exponencialmente con la temperatura. Esto significa que el ciclo del agua se intensifica, lo que hace más severas las inundaciones y las sequías. También habrá más energía para impulsar las tormentas y huracanes.
	Temperaturas extremas (umbral de efectos)	Curva convexa	 Debido a la forma de la distribución normal, un pequeño aumento en la media aumenta dramáticamente la frecuencia de un evento extremo.
Impactos físicos	Producción agrícola	Parabólica inversa $y = -x^2$	 En las regiones más frías, los bajos niveles de calentamiento puede mejorar las condiciones para el crecimiento de los cultivos (extendida temporada de cultivo y nuevas áreas para la apertura de la producción), pero el calentamiento tendrá cada vez más impactos negativos conforme los umbrales de temperatura crítica se cruzan con más frecuencia. La forma y la ubicación de la curva dependerán de los cultivos.
	Mortalidad Humana relacionada con el calor	En forma de U	 En esta forma aumenta la mortalidad humana una vez que la temperatura supera las tolerancias (olas de calor y frío). Inicialmente, la mortalidad se reducirá en un calentamiento en las regiones frías.
	Daño de las tormentas	Cúbica $y = e^x$	 Daños a la infraestructura aumentan al cubo conforme a la velocidad del viento
Respuesta Humana	Costos de la producción de la costa	Parabólica $y = x^2$	 Costos de la construcción de la pared del mar incrementa como un cuadrado por la altura de la defensa.

Fuente: STERN (2007)

5. **Costos económicos dependientes del clima.** Los costos económicos son fuertemente dependientes de las proyecciones climáticas. Por ejemplo, se estima (Stern, 2007) que un aumento de dos o tres grados para el 2050 implica una reducción de 15 a 20% de la producción de cereales. En este sentido, estos impactos económicos dependen crucialmente de las características y condiciones de un posible acuerdo internacional de mitigación.
6. **Costos económicos y procesos de adaptación.** Los costos económicos estimados dependen fundamentalmente de los procesos de adaptación. Esto es, los costos de los impactos climáticos incluyen tanto los costos de las pérdidas como los costos realizados para los procesos de adaptación (Fankhauser, 1995). Sin embargo, estos costos invertidos en adaptación pueden reducir substancialmente los costos totales. Por ejemplo, Easterling *et al.* (1993) estiman, que con un proceso de adaptación correcto, puede existir una reducción de los costos de los impactos económicos de 60%. Debe sin embargo, considerarse que los procesos de adaptación son complejos y que aún se desconoce relativamente sus patrones regulares. Por ejemplo, es común observar que los procesos de adaptación individuales son ineficientes en la medida en que generan externalidades negativas que extienden o trasladan sus impactos posteriores. Esto es, los incentivos privados generan normalmente procesos de adaptación ineficientes basados en la sobreexplotación de otros recursos que se traducen en externalidades negativas crecientes. Resulta indispensable que el sector público ordene y coordine los esfuerzos de adaptación, de modo que se reduzcan los impactos negativos del cambio climático en el contexto de un desarrollo sustentable. En este sentido, los escenarios construidos son sólo indicativos porque no incorporan los procesos de adaptación ya en curso.

La evidencia internacional disponible sobre los costos y beneficios del cambio climático es muy variada e incluye un conjunto de sectores. Así, los principales sectores económicos considerados son agricultura, agua, bosques, biodiversidad, energía, salud, alza del nivel de mar, eventos extremos como huracanes y migración. En los Cuadros 130 y 131 y la Gráfica 157 se sintetizan algunos de estos estudios<sup>78</sup> en donde se observa que los costos globales del cambio climático oscilan entre 1 y 2.5% del PIB mundial, mientras que los costos de la mitigación<sup>79</sup> son entre el 1 al 3% del PIB; ello con el doble de emisiones GEI y un aumento de entre 2 y 3 grados de temperatura global. Debe sin embargo destacarse que los costos estimados en el estudio Stern (2007) son más amplios, básicamente al incluir un horizonte de tiempo mayor, una tasa de descuento más baja y considerar a otros sectores y eventos extremos. Así, los costos estimados, al 2200, oscilan, en un valor medio, de entre 5.3 y 13.8% del PIB y que en sus valores extremos puede llegar incluso a alrededor del 20 o 30% del PIB.

### CUADRO 130. IMPACTO ESTIMADO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN ESTADOS UNIDOS DEL REPORTE DEL IPCC DE 1996 (MILES DE MILLONES DE DÓLARES DE 1990)

Sector	Cline (2.5 C°)	Fankhauser (2.5 C°)	Nordhaus (3 C°)	Titus (4 C°)	Tol (2.5 C°)
Agricultura	17.5	3.4	1.1	1.2	10.0
Pérdida forestal	3.3.	0.7	(a)	43.6	(a)
Pérdida de especies	4.0	1.4	(a)	(a)	5.0
Aumento en el nivel del mar	7.0	9.0	12.2	5.7	8.5
Electricidad	11.2	7.9	1.1	5.6	(a)
Calentamiento no eléctrica	-1.3	(a)	(a)	(a)	(a)

78 Jorgerson *et al.* (2005) estima costos similares de alrededor de 1.2 del PIB con 3 grados de aumento de temperatura.

79 Por ejemplo, Cline (1994 en Fankhauser, 1995) estima que una reducción de 50% de las emisiones entre 2025 y 2050 representa alrededor del 1 a 3% del PIB.

**CUADRO 130. IMPACTO ESTIMADO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN ESTADOS UNIDOS DEL REPORTE DEL IPCC DE 1996 (MILES DE MILLONES DE DÓLARES DE 1990) (CONTINUACIÓN)**

Sector	Cline (2.5 C°)	Fankhauser (2.5 C°)	Nordhaus (3 C°)	Titus (4 C°)	Tol (2.5 C°)
Aire acondicionado móvil	(a)	(a)	(a)	2.5	(a)
Bienestar humano	(a)	(a)	0.75 del PIB	(a)	12.0
Mortalidad y morbilidad humana	5.8	11.4		9.4	37.4
Migración	0.5	0.6		(a)	1.0
Huracanes	0.8	0.2		(a)	0.3
Actividades de recreación	1.7	(a)		(a)	(a)
Oferta de agua					
Disponibilidad	7.0	15.6		11.4	(a)
Contaminación	(a)	(a)		32.6	(a)
Infraestructura urbana	0.1	(a)		(a)	(a)
Contaminación del aire	3.5	7.3		27.2	(a)
Total					
Miles de millones	61.1	69.5	55.5	139.2	74.2
<b>% del PIB</b>	<b>1.1</b>	<b>1.3</b>	<b>1.0</b>	<b>2.5</b>	<b>1.5</b>

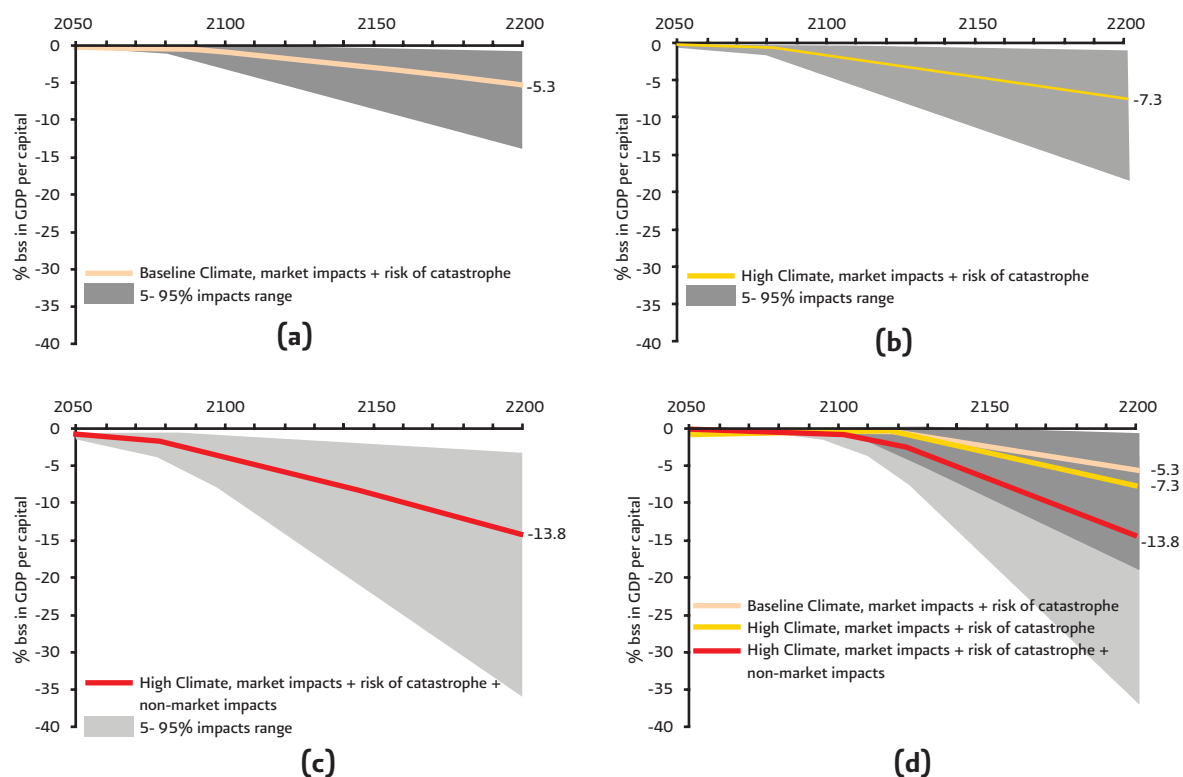
Nota: (a) son sectores que no se cuantificaron o se juzgaron muy pequeños  
Fuente: Nordhaus y Boyer (2000)

**CUADRO 131. COSTOS TOTALES DEBIDOS A UN INCREMENTO DOBLE DEL CO<sub>2</sub>**

Sector	UE	EU	ExURSS	China	OECD	Mundo
Defensa de costas	0.1	0.2	0.0	0.0	0.4	0.9
Uso de suelo	0.3	2.1	1.2	0.0	8.1	14.0
Pérdida de humedales	4.9	5.6	1.2	0.6	16.9	31.6
Pérdida de ecosistemas	9.8	7.4	2.3	2.2	25.5	40.5
Agricultura	9.7	7.4	6.2	7.8	23.1	39.1
Forestal	0.1	0.6	0.4	0.0	1.8	2.0
Energía	7.0	6.9	-0.7	0.7	20.5	23.1
Agua	14.0	13.7	3.0	1.6	34.8	46.7
Mortalidad	13.2	10.0	2.3	2.9	34.4	49.2
Contaminación del aire	3.5	6.4	2.1	0.2	11.9	15.4
Migración	1.0	0.5	0.2	0.6	2.0	4.3
Riesgos naturales	0.0	0.2	0.0	0.1	1.0	2.7
Miles de millones	63.6	61.0	18.2	16.7	180.4	269.5
<b>% del PIB</b>	<b>1.4</b>	<b>1.3</b>	<b>0.7</b>	<b>4.7</b>	<b>1.3</b>	<b>1.4</b>

Notas: pesquerías están incluidas en pérdida de humedales, y los riesgos naturales sólo incluye huracanes  
Fuente: Fankhauser, 1995

Gráfica 157. Costos del cambio climático en los próximos 200 años



Notas: **(a)** Escenario climático base, con impactos de mercado y riesgos de catástrofes. **(b)** Escenario climático mayor con impactos de mercado y riesgos de catástrofes. **(c)** Escenario climático base, con impactos de mercado, riesgos de catástrofes e impactos indirectos (non-market). **(d)** Escenarios combinados

Fuente: Stern (2007)

Estas valoraciones no son sin embargo uniformes y muestran varias características interesantes:

1. Los costos y el nivel de incertidumbre crecen exponencialmente con el aumento de la temperatura. Por ejemplo, Nordhaus (1994) estima que un aumento de más de tres grados de temperatura implica costos entre 0.7 y 8.2% del PIB mundial.
2. Las valoraciones realizadas no siempre incluyen la categoría de bienes y servicios ambientales que no tienen un valor de mercado o incluyen alguna valoración subjetiva. Tal es el caso, por ejemplo, de la biodiversidad (Fankhauser, 1995).
3. El análisis y el tratamiento de los costos catastróficos resulta particularmente complejo y, en la medida en que tienen una importancia creciente y un sesgo hacia los valores negativos pueden modificar la estimación de costos totales (Hitz y Smith, 2004). Por ejemplo, la valoración económica y la administración del riesgo de los costos de eventos de baja probabilidad de ocurrencia pero con consecuencias desastrosas, es difícil incluirlo directamente en los costos esperados, aunque en el largo plazo es necesario considerarlo. Las estimaciones al respecto sugieren, por ejemplo, que la probabilidad de eventos catastróficos oscilan entre 1.2% con un aumento de 2.5 grados de temperatura y de 6.8% de probabilidad con un aumento de 6 grados. Esta probabilidad a cien años deben de ponderarse con precaución.

4. Los costos globales son fundamentalmente distintos por regiones. Por ejemplo, Tol (1993) sugiere que los daños en países sub-desarrollados pueden llegar a ser 4 veces mayores en países desarrollados. Ello se confirma por sectores en la Gráfica 156, donde se observa que los costos con una alza moderada de la temperatura se concentran en los países en desarrollo, mientras que se observan ganancias en los países desarrollados (Stern, 2007).
5. Los costos por diversas actividades económicas son además muy diferentes. En efecto, los Cuadros 132, 133, 134 y 135 muestran una síntesis de los costos esperados por sector y/o actividad económica, tanto en Estados Unidos como en el mundo. Cabe destacar que la mayor parte de los costos en la mayoría de estos estudios se concentran en el sector agrícola (entre 70 y 80% del total de costos) (Jorgerson *et al.*, 2005).

### CUADRO 132. COSTOS AGREGADOS EN EL SECTOR AGRÍCOLA

Aumento en temperatura	Evidencia de efectos en la agricultura
Aumento de 2 grados	Disminuye 5% la producción de cereales
Aumento de 4 grados	Disminuye 10% de producción de cereales
Aumento de 2 a 3 grados	Disminuye 25-30% el sector agrícola con un efecto débil de CO <sub>2</sub> Disminuye un 15-20% el sector agrícola con un efecto fuerte de CO <sub>2</sub> Impactos mayores en África y algunas regiones de Asia y Latinoamérica
Aumento de 3 a 4 grados	Disminuye 25-35% el sector agrícola y se concentran los costos en África, Asia y América central
Aumento 5-6 grados	Colapso de la agricultura aunque con evidencia limitada

Notas: No se incluye adaptación. La información proviene de Stern (2007).

### CUADRO 133. DISPONIBILIDAD DE AGUA

Aumento en temperatura	Evidencia de efectos en la disponibilidad de agua
Aumento de 2 grados	Reducción de 30% de la disponibilidad
Aumento de 4 grados	Reducción de entre 40-50% de la disponibilidad

Notas: No se incluye adaptación. La información proviene de Stern (2007)

### CUADRO 134. PÉRDIDAS EN BIODIVERSIDAD

Aumento en temperatura	Evidencia de efectos en la biodiversidad
Aumento de 1-2	15-40% de extinción de especies
Aumento de 1	10% de extinción de especies
Aumento de 2	15-40% extinción de especies
Aumento de 3 g	20-50 % de extinción de especies

Fuente: Stern (2007)

## CUADRO 135. COSTOS DE EVENTOS EXTREMOS, AGUA Y SALUD

Efectos	Costos
Eventos extremos	Costos de entre 0.5 y 1 por ciento del PIB
Agua	No existe un consenso (O'Neill, <i>et al.</i> , 2001)
Salud	300,000 muertes para el 2030

Fuente: Stern (2007).

En este mismo sentido, puede incluso considerarse la presencia de beneficios potenciales asociados a la reducción de la contaminación atmosférica en las grandes ciudades (Cuadro 136)

## CUADRO 136. REDUCCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE DEBIDO A DISMINUCIÓN (% DE REDUCCIÓN COMPARADO CON EL ESCENARIO BASE)

País	Año	Politica/escenario	CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	CO	Part.	VOC	Benef. Secundarios
Europa <sup>1</sup>	2000	i) Impuesto al carbón energía y estructura actual de producción	9.4	7.4	6.2	Nd	Nd	Nd	6.1
		ii) Régimen costo eficiente	9.7	9.3	6.4	Nd	Nd	Nd	6.6
Noruega	2000	Estabilización de emisiones (nivel de 1989)	15.0	20.8	10.8	24.1	4.3	Nd	40-140 <sup>2</sup>
Reino Unido	2005	Impuesto al carbón/energía	12.1	38.3	10.6	9.6	30.3	1.1	40-1040
EU	2000	Estabilización de emisiones:	8.6	1.9 <sup>3</sup>	6.6	1.5	1.0/1.8 <sup>4</sup>	1.4	2.0-20
		i) Impuesto al carbono	8.6	2.2 <sup>3</sup>	6.6	3.4	1.6/2.2 <sup>4</sup>	2.7	3.5-2.8

Notas: 1) Europa del este y oeste, impuesto en Francia, Alemania, Reino Unido, Italia, Holanda, Dinamarca, Noruega, Finlandia y Suecia. 2) Incluye beneficios por el tráfico (reducción en la congestión, ruido, accidentes y costo de daños de caminos). 3) SO<sub>x</sub>. 4) PM<sub>10</sub>/TSP.

Fuente: Fankhauser, 1995

La identificación correcta de las estimaciones de costos de los impactos del cambio climático y de los costos de la mitigación resulta, desde la óptica de la política pública y de la sociedad, fundamental para definir una estrategia eficiente para enfrentar el cambio climático. Desde luego, la presencia de costos más altos asociados a los impactos del cambio climático que aquellos asociados a los procesos de mitigación, se convierte en un argumento sólido para apoyar un acuerdo global para reducir las emisiones de GEI. Por ejemplo, Stern (2007) estima que los costos de la inacción implica perder entre el 5 y el 13% del PIB, mientras que los costos de mitigación llegan a sólo 1% del PIB, aunque con un rango de variación de entre -2 y 5% del PIB (Stern, 2007). Debe reconocerse que existen estimaciones de costos de mitigación más elevados como puede observarse en el Cuadro 137.

## CUADRO 137. PÉRDIDA DEL PIB DEBIDO A ESTABILIZACIÓN DE EMISIONES A LOS NIVELES DE 1990 (% DE CAMBIO RELATIVO A LA BASE)

País región	Edmons Reilly		GREEN		Manne Richels	
	2020	2050	2020	2050	2020	2050
EU	0.58	0.81	0.29	0.36	1.08	2.11
Otros países de la OECD	0.74	0.92	0.30	0.62	0.75	1.31
Ex - URSS	0.02	0.33	1.39	2.07	1.34	0.79
China	3.42	5.67	3.37	5.56	2.80	4.05
Resto del mundo	1.76	2.96	3.89	4.45	5.20	5.38

Fuente: Fankhauser, 1995



Debe sin embargo, considerarse que estas estimaciones de costos dependen del acuerdo internacional que se alcance, de las estimaciones respectivas de los impactos y, de las curvas de abatimiento o de los costos sociales del carbono. Es en este contexto, que se ubica la propuesta de Nordhaus (2008) de apoyar una reducción de 15% de reducciones de GEI sobre la línea base como una estrategia eficiente económicamente.

### Costos sociales del carbono

La estimación de los costos de mitigación tiene como fundamento los costos sociales estimados de abatimiento por tonelada de carbono y lo que sugiere además los costos de una estrategia de mitigación. Así, por ejemplo, suponiendo un costo social de la tonelada de carbono en 30 dólares por tonelada lo que implica costos por persona promedio de 150 dólares (Nordhaus, 2008)

Destaca que estos costos son muy variables y difíciles de predecir con precisión como se observa en el Cuadro 1 y que lo confirma el que se estiman que los costos de las tecnologías van entre 500 y 1200 dólares por tonelada de carbono (Nordhaus, 2008).

Impuesto de 27 dólares la tonelada de carbono aumenta de entre 2 a 3 %

Tasa de descarbonización a PIB 1.7% y 0.6 en el futuro Nordhaus, 2008

### CUADRO R1. ESTIMACIONES EXISTENTES DE COSTOS DE EMISIÓN DE CO<sub>2</sub> (DÓLARES POR TONELADA)

Estudio	Tipo	1991-2000	2001-10	2011-20	2021-30
Nordhaus (1991)	MC		7.3		
Ayres y Walter (1991)	MC		30-35	43.6	
Nordhaus (1993)	CBA	5.3	6.8	8.6	10.0
Cline (1992, 1993)	CBA	5.8-124	7.6-154	9.8-186	11.8-221
Peck y Teisberg (1992)	CBA	10-12	12-14	14-18	18-22
Madisson (1993)	CBA/MC	5.9-6.1	8.1-8.4	11.1-11.5	14.7-15.2

Notas: MC, costo marginal actual, CBA precio sombra de un estudio de costo-beneficio.

Fuente: Fankhauser, 1995

## 2. CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE LA VALORACIÓN ECONÓMICA

El análisis de costo beneficio (CBA) se aplica para valorar diversas políticas públicas y considerar todas las ganancias y pérdidas potenciales de una propuesta específica convertidas a unidades monetarias. En este sentido, el CBA permite comparar y se utiliza como regla de decisión. Esta metodología<sup>80</sup> consiste en:

1. Identificar los costos y beneficios donde se justifica su importancia.
2. Se cuantifican los costos y beneficios de la medida de política pública a considerar.
3. Se valoran monetariamente estos costos y beneficios. Ello implica predecir los flujos futuros. Este proceso es en extremo complejo atendiendo a la presencia de competencia imperfecta, intervención del gobierno, ausencia de precios de mercado, la existencia de externalidades negativas o de elementos difíciles de evaluar como la vida humana<sup>81</sup>. Ello lleva en ocasiones a utilizar, por ejemplo, precios sombra o distintas formas de valoración económica (Nas, 1996).
4. Se aplica una tasa de descuento para transferir en el tiempo los costos y beneficios que genera la política pública propuesta y obtener el valor presente neto del proyecto.
5. A través de una regla de decisión se opta por aplicar o descartar la política pública seleccionada. En este caso, se opta por seleccionar las mejores opciones para México con respecto al cambio climático.

Este tipo de análisis plantea al menos tres problemas inmediatos desde la óptica de la valoración del costo beneficio del cambio climático.

Las dificultades de incluir en el análisis factores que no tienen un valor económico. Por ejemplo, la biodiversidad. En este sentido, en la valoración realizada se incluye a aquellos elementos que tienen un valor de mercado y aquellos otros factores que no están valorados directamente en el mercado; se busca incluirlos a través de métodos indirectos.

Los análisis de CBA tienen una tendencia a ignorar el riesgo en este tipo de valoraciones. Ello resulta particularmente preocupante en un análisis económico del cambio climático que contiene un riesgo mínimo de pérdidas grandes, pero en un periodo de tiempo largo que debe ponderarse con extrema precaución. En este sentido, es necesario ponderar la irreversibilidad de ciertos procesos y la complejidad de los sistemas tanto sociales como naturales, que conducen a respuestas no lineales o de límite. Asimismo, persiste aún una incertidumbre importante y cierta ignorancia sobre los resultados de muy largo plazo.

La selección de la tasa de interés de descuento (Fankhauser, 1995 y O'Neill, *et al.*, 2005 y Nordhaus, 2008). La tasa de descuento resulta fundamental para evaluar los costos y beneficios del cambio climático que es un fenómeno con impactos de largo plazo. Desde luego, una tasa de descuento más elevada supone un mayor descuento del futuro, lo que muestra una mayor indiferencia hacia las generaciones futuras. La tasa de descuento del consumo (consumption rate of discount) tiene dos componentes normativos no observables (Nordhaus, 2008 y Hanley y Spash, 1993). El primer componente corresponde a la tasa pura de preferencia en el tiempo. Este parámetro busca medir que el consumo futuro tiene un valor menor que el consumo actual o la impaciencia por el consumo. El segundo parámetro es la tasa decreciente de utilidad marginal del ingreso y refleja la apreciación que implica un ingreso adicional; por ello esta tasa es multiplicada por la tasa de crecimiento del ingreso de equilibrio ( $\gamma$ ) para estimar el impacto total.

80 Existen desde luego una gran cantidad de críticas al análisis de costo beneficio (CBA) (Hanley y Spash, 2003).

81 El valor de la vida se puede obtener a través de diversos métodos (Jones-Lee, 1994).

Así, las generaciones futuras con un mayor nivel de ingreso tendrán una utilidad marginal menor a una unidad de ingreso; por ello, es necesario considerar que el riesgo futuro debe ponderarse por el nivel de ingreso (Nordhaus, 2008):

$$(35) \quad \tau = \sigma + wy$$

Donde  $\tau$  representa la tasa de descuento del consumo,  $\sigma$  es la tasa pura de descuento de preferencia en el tiempo,  $w$  es la elasticidad ingreso de la utilidad marginal,  $e$  y es la tasa de crecimiento del ingreso de equilibrio. Estos parámetros desde luego reflejan un conjunto de factores en una economía, como pueden ser las decisiones de consumo y ahorro o la tasa de ganancia de una inversión o incluso, simplemente la tasa de interés bancaria. En este sentido, la selección de la tasa de descuento es, en síntesis, una descripción en la forma en que actualmente responden los agentes como las formas de considerar el futuro. En este sentido, la decisión de la tasa de descuento a utilizar es tanto una estimación técnica como una decisión ética. Por ejemplo, diversos autores como Stern, (2007) han argumentado que una tasa de descuento apropiada al evaluar las condiciones de un desarrollo sustentable, es distinta de aquella que se puede utilizar para evaluar un proyecto específico.

De este modo, debe aplicarse una tasa social de preferencias que es distinta, normalmente más baja tendiendo a tres factores:

- Existe un proceso de super-responsabilidad con las generaciones futuras, lo que debe reflejarse en la tasa de descuento a aplicar.
- La población tiene un rol dual, en la medida en que está más preocupada por las generaciones futuras que en su rol de consumidores.
- El efecto de la soledad. Esto es, los individuos solos ahorran menos que en colectivo.

En este sentido, elegir una tasa de descuento no es exclusivamente una decisión técnica sino que también implica una opción ética (Hanley y Spash, 1993). La tasa de descuento no se estima, se elige (Hanley y Spash, 1993). La evidencia disponible al respecto incluye un abanico muy amplio de tasas de interés. En este trabajo se decidió utilizar tres escenarios:

- 4%
- 2%
- 0.5%

Ello busca reflejar que es necesario considerar ejercicios de sensibilidad para reducir los niveles de incertidumbre reconociendo y seleccionando una tasa acorde con un desarrollo sustentable. En este sentido, aplicar una tasa más elevada, dado el horizonte de tiempo involucrado del fenómeno, se traduce en eliminar los impactos normalmente más significativos.

### 3. COSTOS Y BENEFICIOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN MÉXICO

La valoración de los costos y beneficios totales del cambio climático en México se sintetizan en el Cuadro 138. Se hace una separación entre los costos de mercado y aquellos que no pasan por el mercado. Los costos totales del cambio climático alcanzan al 2100, con una tasa de descuento del 4%, alrededor del 6.2% del PIB y llegan al 30% del PIB con una tasa del 0.5%. Estos costos no incluyen impactos adicionales estimados, tales como, actividades pecuarias y eventos extremos y los costos fuera del mercado en biodiversidad y vidas humanas. Desde luego, estos costos deben de tomarse con precaución ya que suponen que no existen procesos y costos de ajuste y adaptación.

**CUADRO 138 . COSTOS TOTALES DEL CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA ECONOMÍA MEXICANA AL 2050 Y 2100**

Sector	2050											
	Tasa de descuento 0.5%				Tasa de descuento 2%				Tasa de descuento 4%			
	B1	A1B	A2	Promedio de los escenarios	B1	A1B	A2	Promedio de los escenarios	B1	A1B	A2	Promedio de los escenarios
Agrícola	2.11%	2.82%	2.42%	2.45%	1.37%	2.44%	1.56%	1.79%	0.80%	1.07%	0.90%	0.92%
Agua	7.59%	7.59%	7.59%	7.59%	4.02%	4.02%	4.02%	4.02%	2.20%	2.20%	2.20%	2.20%
Uso de suelo	0.17%	0.37%	0.57%	0.37%	0.08%	0.18%	0.28%	0.18%	0.03%	0.07%	0.11%	0.07%
Biodiversidad	0.02%	0.05%	0.02%	0.03%	0.01%	0.03%	0.01%	0.02%	0.01%	0.02%	0.00%	0.01%
Turismo internacional	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.00%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
<b>TOTAL</b>	<b>9.90%</b>	<b>10.84%</b>	<b>10.60%</b>	<b>10.45%</b>	<b>5.49%</b>	<b>6.68%</b>	<b>5.87%</b>	<b>6.01%</b>	<b>3.04%</b>	<b>3.36%</b>	<b>3.21%</b>	<b>3.20%</b>
Pecuario	1.10%	1.44%	1.24%	1.26%	0.71%	0.94%	0.80%	0.82%	0.41%	0.55%	0.46%	0.47%
Biodiversidad-Indirecto	0.23%	0.42%	0.16%	0.27%	0.13%	0.16%	0.06%	0.12%	0.08%	0.01%	0.01%	0.03%
<b>TOTAL (incluyendo pecuario y biodiversidad indirecto)</b>	<b>11.22%</b>	<b>12.70%</b>	<b>12.01%</b>	<b>11.98%</b>	<b>6.34%</b>	<b>7.78%</b>	<b>6.73%</b>	<b>6.95%</b>	<b>3.53%</b>	<b>3.92%</b>	<b>3.68%</b>	<b>3.71%</b>

Sector	2100											
	Tasa de descuento 0.5%				Tasa de descuento 2%				Tasa de descuento 4%			
	B1	A1B	A2	Promedio de los escenarios	B1	A1B	A2	Promedio de los escenarios	B1	A1B	A2	Promedio de los escenarios
Agrícola	7.54%	11.15%	11.05%	9.91%	3.34%	4.83%	4.63%	4.26%	1.35%	1.91%	1.74%	1.67%
Agua	18.85%	18.85%	18.85%	18.85%	9.41%	9.41%	9.41%	9.41%	4.50%	4.50%	4.50%	4.50%
Uso de suelo	-0.41%	-0.28%	-0.15%	-0.28%	-0.12%	-0.08%	-0.04%	-0.08%	-0.02%	-0.02%	-0.01%	-0.02%
Biodiversidad	0.18%	0.67%	0.71%	0.52%	0.06%	0.22%	0.24%	0.17%	0.02%	0.05%	0.06%	0.04%
Turismo internacional	0.09%	0.19%	0.18%	0.16%	0.04%	0.08%	0.07%	0.06%	0.02%	0.03%	0.03%	0.02%
<b>TOTAL</b>	<b>26.24%</b>	<b>30.58%</b>	<b>30.64%</b>	<b>29.16%</b>	<b>12.73%</b>	<b>14.46%</b>	<b>14.30%</b>	<b>13.83%</b>	<b>5.86%</b>	<b>6.48%</b>	<b>6.32%</b>	<b>6.22%</b>
Pecuario	3.76%	5.27%	5.18%	4.73%	1.68%	2.32%	2.21%	2.07%	0.69%	0.94%	0.86%	0.83%
Biodiversidad-Indirecto	3.63%	8.53%	7.58%	6.58%	1.35%	3.04%	2.63%	2.34%	0.42%	0.80%	0.69%	0.63%
<b>TOTAL (incluyendo pecuario y biodiversidad indirecto)</b>	<b>33.63%</b>	<b>44.38%</b>	<b>43.40%</b>	<b>40.47%</b>	<b>15.76%</b>	<b>19.82%</b>	<b>19.14%</b>	<b>18.24%</b>	<b>6.96%</b>	<b>8.21%</b>	<b>7.86%</b>	<b>7.68%</b>

Por su parte, los costos de la mitigación con reducciones al 50% de emisiones al 2100 con respecto al 2002 y una tasa de descuento del 4% se sintetizan en los Cuadros 139 y 140. Estos costos se ubican, con una tasa del 4% entre 0.7 y 2.2% del PIB. Los costos de la mitigación representan, probablemente el límite superior atendiendo a que no se aplicó ningún procedimiento de minimización de costos. En este sentido, los costos de la inacción son superiores a los costos de la mitigación, bajo el supuesto de un acuerdo internacional al respecto.

### **CUADRO 139. COSTO TOTAL DE LA REDUCCIÓN DE EMISIONES DE CO<sub>2</sub> PARA LA META DE 50% RESPECTO AL 2002 EN EL 2100**

Costos	%PIB		
	0.50%	2%	4%
Precio 9.56	2.10	1.20	0.70
Precio 30	6.60	3.76	2.21

### **CUADRO 140. COSTO TOTAL DE LA REDUCCIÓN DE EMISIONES DE CO<sub>2</sub> PARA LA META DE 50% RESPECTO AL 2002 EN EL 2050**

Costos	%PIB		
	0.5%	2%	4%
Precio 9.56	1.03	0.77	0.56
Precio 30	3.24	2.43	1.75

## **4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Las estimaciones de costos y beneficios presentados en este apartado son, desde luego, solo indicativos. Esto es, la construcción de escenarios a 100 años plazo es obviamente una tarea en extremo compleja, con un alto grado de incertidumbre y en todo caso sólo sugieren posibles trayectorias. No obstante ello, es posible identificar varias tendencias importantes que es necesario considerar:

1. Los costos del cambio climático son heterogéneos, no lineales y crecientes en el tiempo. Así, se observa que un ligero aumento de temperatura puede ser incluso benéfico en algunas regiones del país. Sin embargo, el aumento continuo de la temperatura tiene efectos negativos crecientes en el conjunto de las actividades económicas. Más aun, existen límites irreversibles, donde los costos aumentan más que proporcionalmente. Además, los riesgos de daños muy elevados asociados a eventos extremos aumenta con el tiempo. En este sentido, es necesario no sólo compensar por los costos y beneficios del cambio climático sino también considerar “la compra de un seguro” ante la posibilidad de cambios o impactos más extremos.
2. Los resultados presentados en este apartado indican que los costos y los beneficios asociados al cambio climático son ciertamente elevados. En ambos casos, los costos son superiores a aquellos que generalmente se estiman en países desarrollados. Sin embargo, los costos de los impactos climáticos resultan superiores a los costos de mitigación y, además existen costos fuera del mercado que son inadmisibles como la pérdida irreversible de biodiversidad. Desde luego, ello no implica para un país necesariamente la decisión de una acción unilateral, pero plantea la conveniencia de apoyar la construcción de un acuerdo internacional al respecto.

3. En todo caso, es posible y necesario limitar los impactos del cambio climático y evitar los impactos exponenciales futuros. En este sentido, es fundamental mantener un crecimiento continuo y elevado, ya que ello permite reducir los impactos climáticos y facilita la adaptación, asimismo, con un mayor nivel de ingreso los riesgos de los eventos extremos se pondera de manera distinta (Nordhaus, 2008).

## 5.2. EL CAMBIO CLIMÁTICO Y LAS POLÍTICAS PÚBLICAS EN MÉXICO

### Puntos fundamentales

México ha transitado por un proceso importante de cambios estructurales económicos, sociales y políticos en donde, simultáneamente, se ha desarrollado en la sociedad mexicana una mayor conciencia sobre la protección al medio ambiente y las consecuencias del cambio climático. En este contexto, el gobierno tiene el reto de planificar, diseñar y aplicar instrumentos de gestión ambiental que sean efectivos y económicamente eficientes en el logro de las metas ambientales y en el combate a los desafíos que presenta el cambio climático. Para ello es indispensable desarrollar una estrategia global, que coordine el conjunto de acciones y de las políticas públicas orientadas a mitigar y adaptarse al cambio climático. En efecto, el cambio climático tiene consecuencias negativas y representa costos económicos significativos para la economía mexicana. Sin embargo, las políticas instrumentadas sobre el cambio climático en México aún muestran fallas de coordinación y de integración. En este contexto, la planeación y la regulación ambiental en México, no obstante los avances alcanzados en algunas áreas, tiene aún un amplio margen para mejorar. La presencia de externalidades negativas, asociada al deterioro ambiental debe ser atendida en forma consistente. Esto es, existe la percepción de que los problemas ambientales, no obstante su magnitud, son externalidades y casos excepcionales. Sin embargo, estos problemas, por desgracia no son la excepción sino la norma y por tanto deben atenderse de esta forma.

La solución de los problemas ambientales debe contemplar el uso combinado de regulaciones ambientales y de la aplicación de instrumentos económicos. Ello resulta fundamental, ya que en ocasiones, se observa en México que los incentivos económicos y las regulaciones no se encuentran alineados generando resultados disímiles. El predominio del uso de regulaciones sobre los instrumentos económicos no es casuístico sino que tiene sentido, lo que deben ponderarse al diseñar una estrategia climática global. Por el contrario, la aplicación de instrumentos económicos para fines ambientales ha sido más bien casuística, a pesar de las ventajas demostradas que suponen dichos instrumentos, y a pesar también de que están previstos de distintas formas en la legislación desde la última década del pasado siglo. Incluso, es posible que sea necesario modificar el conjunto de la estructura de precios relativos para que sea consistente con un desarrollo sustentable.

En este contexto se observa que existen diversas políticas que deben instrumentarse tales como:

- Modificar los precios de la energía incluyendo sus costos ambientales. Ello no resolverá las necesidades de mitigación de emisiones, pero sin dichas políticas no será posible alcanzar las metas de mitigación que requiere la estrategia de cambio climático.
- México enfrentará en las próximas décadas una mayor necesidad de aplicar una política científica y tecnológica alineada con las exigencias de la mitigación de emisiones de efecto invernadero y de los procesos de adaptación.
- Existen señales contradictorias en referencia a los objetivos de mitigación y protección del medio ambiente. Existen una serie de subsidios, tarifas privilegiadas y políticas de precios fijos, que hacen que los sectores productivos carezcan de incentivos para mejorar su desempeño. Mientras los costos de producción no reflejen los costos sociales del consumo de combustibles de origen fósil y de la emisión de gases de efecto invernadero, los sectores industrial, agropecuario o de transporte no tendrán incentivos para mejorar su desempeño. Ello se observa también en otros campos como el agua.
- Modificar algunas de las partidas de gasto público o tarifas que no contribuyen a una senda baja en carbono y en donde destacan:
  - **Subsidio al uso de agua en la agricultura (tarifa 09).**  
Gasto público destinado a ampliar la frontera agrícola.  
Precios relativos bajos de la energía y los combustibles.
- Necesario profundizar la coordinación de las políticas públicas sobre cambio climático.

## 1. INTRODUCCIÓN

El gobierno tiene el reto de planificar, diseñar y aplicar instrumentos de gestión ambiental que sean efectivos y económicamente eficientes en el logro de las metas ambientales y en el combate a los desafíos que presenta el cambio climático. La evolución reciente de la economía mexicana, con su consecuente aumento del PIB y de la población, muestra tanto consecuencias negativas como positivas sobre el medio ambiente. En efecto, la dinámica poblacional y

la actividad económica tienen asociados diversos costos ambientales, debido en parte, a la gran cantidad de recursos naturales e insumos ambientales utilizados en la producción y a las emisiones o residuos que se generan.

El gobierno mexicano ha identificado la necesidad de controlar y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) sobre todo en los sectores en los que es posible lograr co-beneficios ambientales, económicos y de competitividad, y de impulsar capacidades de respuesta ante los impactos previsibles del cambio climático y asimismo reducir los impactos negativos relacionados al cambio climático. Debe sin embargo coordinar sus políticas en esta dirección.

## **2. PLANEACIÓN Y REGULACIONES AMBIENTALES: UNA PERSPECTIVA GENERAL**

La planeación y las regulaciones ambientales tienen como objetivo fundamental la protección del medio ambiente. En este contexto, la teoría económica argumenta que la mayoría de los problemas ambientales son consecuencia de que los bienes ambientales son bienes públicos, de acceso ilimitado y donde no se valora, desde el punto de vista económico, apropiadamente su contribución al proceso económico, de modo que las fuerzas del mercado no proveen los incentivos adecuados. De este modo, en la planeación estratégica sobre el cambio climático las regulaciones ambientales deben entonces fundamentarse en los incentivos económicos adecuados, pero sin que ello implique colocar exclusivamente en el centro del análisis a los estudios de costo beneficio, sino mantener a los estándares ambientales para salvaguardar la salud pública y la preservación responsable del medio ambiente, como el eje de las regulaciones ambientales.

## **3. LAS POLÍTICAS PÚBLICAS EN MÉXICO ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO**

México ha realizado esfuerzos importantes, en torno a la conformación de una política ambiental para enfrentar los desafíos del cambio climático. Así, el Gobierno Mexicano considera la necesidad de reducir sus emisiones de GEI sin afectar el crecimiento económico y el desarrollo. Como parte de este proceso, las autoridades mexicanas ya han hecho pública la intención de que México reduzca voluntariamente sus emisiones hacia el 2050 tomando como base el año 2000. Ello estaría supeditado al cumplimiento de ciertas condiciones financieras, tecnológicas y en general de cooperación y de cumplimiento de la comunidad internacional. En este sentido, resulta fundamental explorar y utilizar de forma más intensa opciones de financiamiento ya existentes, tales como las iniciativas que ofrece el mecanismo de desarrollo limpio.

### **3.1 POLÍTICAS DE CONTROL ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO**

#### **3.1.1 SECTOR GENERACIÓN DE ENERGÍA**

##### **SECTOR GENERACIÓN DE ENERGÍA**

Sin duda el consumo de energía es un factor fundamental para el funcionamiento de cualquier economía moderna y representa un elemento esencial en la definición de una estrategia para un desarrollo económico sustentable. La estrategia de mitigación debe estar orientada en buena medida, a incentivar un consumo más eficiente de la energía de origen fósil, al eliminar las señales erróneas que está recibiendo el consumidor nacional de energéticos y, a modificar la matriz energética actual para descarbonizarla. En este sentido, las políticas hacia el sector deben buscar el desacoplamiento de las trayectorias de consumo de energía, producto y nivel de empleo, mediante una política combinada de innovación tecnológica y el uso de los precios relativos de la energía. Por otra parte, es importante señalar que el sector energético es un importante consumidor de energéticos. De seguir la tendencia mundial, la



generación de energía tiende a volverse menos sucia, principalmente por la sustitución del petróleo por gas natural o por el desarrollo de mecanismos limpios y energías renovables e incluso al considerar la opción nuclear.

En este sentido, se proponen las siguientes medidas:

### ENERGÍA:

- Aprovechar el potencial de mitigación que tienen las empresas públicas, PEMEX y CFE. Ello incluye fijar normas que limiten la emisión de gas a la atmósfera de estas empresas públicas, fijar normas de eficiencia energética en la utilización de equipos de generación de energía y la constitución de un mercado de carbono.
- Desarrollar proyectos que aprovechen el potencial de la cogeneración, incluyendo una normatividad para la conexión a la red de distribución de energía eléctrica y su comercialización al servicio público.
- Incorporar en los programas de inversión de las empresas públicas del sector de energía, los cálculos de las externalidades por emisiones de GEI utilizando los precios de la tonelada de carbono evitada con tecnologías alternativas.
  - a. Mejorar la eficiencia energética a través de:
    - Establecer normas más estrictas con estándar internacional para aparatos electrodomésticos y aparatos y equipos de uso industrial, con certificación que permita a los consumidores conocer las ventajas y características de los equipos.
    - Imponer una meta para eliminar la producción y uso de focos incandescentes y desarrollar programas de apoyo a los consumidores de bajos ingresos.
    - Programa nacional para la sustitución de focos incandescentes del alumbrado público.
  - b. Modificar la matriz energética hacia una oferta barata confiable y eficiente y con un menor contenido de carbono.
  - c. Actualizar el marco jurídico y normativo para incentivar la generación de energía con fuentes renovables, permitiendo la participación de la inversión privada. Asimismo, diseñar una estrategia nacional de generación de energía eléctrica a partir de fuentes alternativas limpias considerando incluso la opción nuclear, con especial atención a la seguridad de las plantas e instalaciones.

### CONSUMO DE GASOLINA:

La estrategia de mitigación, para el caso del transporte automotor, y en especial sobre el consumo de gasolinas debe orientarse a:

- Cambios en los precios de la gasolina y de automóviles para que reflejen el costo real de utilizar el automóvil, incluyendo las externalidades negativas.
- Esta medida debe ser acompañada por una política de control orientada a incrementar la eficiencia promedio, de la flota vehicular.
- También se requiere hacer más eficiente el transporte público, a fin de que sea un sustituto del transporte privado.
- Anticipar la producción de gasolinas de tercera generación en los programas de inversión de PEMEX.
- Elaborar normas más estrictas para el transporte público federal, incluyendo la limitación de tiempo de vida útil del equipo y, programas más estrictos de verificación de las condiciones de mantenimiento de los motores.
- Desarrollar y fomentar sistemas de transporte limpio o de baja intensidad de carbono tales como el desarrollo de sistemas ferroviarios, los sistemas multimodales, los sistemas urbanos de transportación en carriles confinados.

## DEFORESTACIÓN Y CAMBIO DE USO DEL SUELO

- Limitar la expansión de la frontera agropecuaria, que es uno de los principales procesos causales de la deforestación y degradación de bosques.
- La extensión y reformulación del PROCAMPO ecológico, con una focalización bien definida bajo claros criterios de mitigación.
- Vincular territorios pobres y marginados a los mercados por medio de procesos de reconversión productiva.
- Apoyar plantaciones forestales de protección.
- Protección forestal contra incendios.
- Protección forestal contra plagas y enfermedades.
- Fomentar el establecimiento de plantaciones forestales de calidad, propiciar su adecuado mantenimiento y reposición, con la finalidad de producir materias primas industriales y de disminuir la presión sobre los bosques nativos.

## SUBSIDIOS AGROPECUARIOS

En este contexto, los apoyos hacia el sector por parte del ejecutivo federal se han orientado básicamente a incrementar la productividad o bien compensar la caída de los ingresos agrícolas, ante condiciones adversas en el mercado. Sin embargo, los programas de fomento al campo no han estado vinculados a objetivos ambientales o de conservación de recursos naturales. Se requiere por tanto modificar esta tendencia.

Eliminar paulatinamente, la tarifa 09 que subsidia el uso del agua en las actividades agrícolas y que fomenta implícitamente la explotación no sustentable de los acuíferos y el uso de tecnologías ineficientes de riego. Así se propone:

- Desarrollar programas para el aprovechamiento racional de los recursos naturales, en especial del agua.
- Programas de internalización paulatina de los costos del bombeo en zonas agrícolas de riego.

## MERCADO DE CARBONO

El Mercado de Carbono: Construir un sistema de permisos comercializables de carbono en México.

Considerar la instauración de un precio al carbono. Ello contribuirá a buscar que se consideren en las diversas actividades económicas las externalidades negativas ocasionadas por el cambio climático y contribuirá a un proceso paulatino de descarbonización de la economía mexicana.

## 4. ADAPTACIÓN

El proceso de adaptación es un componente fundamental para evaluar los impactos del cambio climático y por tanto es un elemento que debe incluirse en la estrategia. Por ejemplo, un proceso de adaptación exitoso puede incluso reducir los impactos del cambio climático en más de la mitad. En este sentido, las formas de adaptación para cada uno de estos impactos es distinta. Los procesos de adaptación tienen costos significativos, pero también existen costos importantes de no realizarse la adaptación. De hecho, las proyecciones realizadas sugieren que la magnitud de los ajustes necesarios en el largo plazo son impresionantes, lo que muestra que la adaptación será insuficiente para resolver los problemas del cambio climático. En este sentido, la adaptación puede reducir los costos del cambio climático, pero es insuficiente para controlar sus impactos.

De este modo, es importante considerar la capacidad de adaptación en las distintas actividades económicas y en los agentes económicos. Por ejemplo, existen diversas condiciones de adaptación entre el sector público y el privado:

1. En el sector privado el proceso de adaptación se basa en ajustes en el comportamiento de los agentes (i.e. cambio de días de siembra) y de la tecnología y del capital disponible. Estas condiciones son mejores en los países desarrollados que parecen tener entonces mejores condiciones de adaptación. De hecho, puede argumentarse que los países con mayor ingreso *per cápita* tienen mejores condiciones de adaptación, además de que probablemente reciban impactos del cambio climático menores.
2. El sector público requiere de instituciones públicas fuertes y eficientes que promuevan y ordenen el proceso de adaptación. En este sentido, los países en desarrollo tienen una menor capacidad de adaptación que aquella disponible en los países desarrollados con instituciones sólidas. Asimismo, es común que las instituciones públicas tengan otros intereses, como sus impactos distributivos que pueden interferir en un proceso de adaptación exitoso.

En este contexto, la construcción de un proceso de adaptación eficiente y exitoso debe considerar los siguientes puntos:

1. Una adaptación es eficiente en el caso en que los beneficios exceden los costos. Por desgracia, con la estructura de precios relativos actuales el sector privado puede buscar una adaptación que aparece como eficiente, pero que no incluye las externalidades negativas que genera. Así, esta adaptación privada es ineficiente en la medida en que genera externalidades negativas adicionales no contabilizadas en los precios de mercado actuales. Por ejemplo, en la agricultura se compensa el aumento de la temperatura con un incremento del riego, probablemente sobre-explotando los mantos acuíferos. Asimismo, los impactos climáticos se aplican sobre grupos heterogéneos que reaccionan de manera distinta, que tienen capacidades diferenciadas y que probablemente tengan incluso interacciones entre los distintos grupos.
2. La adaptación se hace bajo incertidumbre, lo que aumenta sus costos y reduce su eficiencia ante la falta de información oportuna y de largo plazo.

En este sentido, la adaptación privada puede ser ineficiente en la medida en que genera externalidades que no son corregidas. Es por ello necesario que el sector público lidere el proceso de adaptación, aunque debe reconocerse que ello no garantiza eficiencia. En todo caso una adaptación eficiente debe tener costos menores que sus beneficios incluyendo las externalidades negativas. Entre los posibles procesos de adaptación que se desprenden del estudio están:

## SECTOR AGROPECUARIO

- a. Cambios en las prácticas agrícolas con:
  - Introducción de variedades de mayor rendimiento.
  - Estudios sobre cultivos resistentes a la inundación, a temperaturas elevadas a la sequía, y a la diseminación de tales cultivos.
  - Nuevos esquemas de riego para regiones áridas cultivadas.
  - Uso adecuado de fertilizantes.
  - Implementación de un sistema de control de plagas y enfermedades.
  - Reducir los efectos de la contaminación del suelo y del agua superficial, producida por el uso indiscriminado de pesticidas y herbicidas.
  - Mover la agricultura más sensible al clima al altiplano y regiones con más agua, sin que ello impacte substancialmente el cambio de uso de suelo.

- b. Difundir los seguros agrícolas y pecuarios basados en índices meteorológicos. Estas pólizas de seguros permiten a los agricultores manejar mejor los riesgos y los estimulan a invertir en actividades agrícolas que exigen una inversión inicial más alta.
- c. Necesario proveer, a través de agencias gubernamentales, la información adecuada sobre el cambio climático.
- d. Aplicar una normatividad internacional en la utilización de agroquímicos.
- e. Fomentar la agro silvicultura y la agroforestería, fomentar el aprovechamiento de tierras marginales para cultivos perennes. Fomento a la labranza de conservación.

## SECTOR FORESTAL

- a. Plantaciones forestales de protección: para controlar procesos erosivos, regular el régimen hídrico, captar CO<sub>2</sub> y disminuir su vulnerabilidad frente al cambio climático
- b. Protección forestal contra incendios.
- c. Protección forestal contra plagas y enfermedades.
- d. Fomentar el establecimiento de plantaciones forestales con un mantenimiento y reposición adecuado para producir materias primas industriales y disminuir la presión sobre los bosques nativos.

## AGUA

- a. Mejorar la administración del agua.
- b. Controlar la demanda de agua haciéndola más eficiente.
- c. Construir infraestructura adecuada para mejorar la administración del agua.

## BIODIVERSIDAD

- a. Existen opciones limitadas para la adaptación en algunos ecosistemas (por ejemplo, los arrecifes coralinos de áreas en altas latitudes/altas altitudes) debido a su sensibilidad y/o exposición al cambio climático. Para algunos de estos sistemas (entre ellos los arrecifes coralinos), las opciones para la adaptación pueden incluir la limitación de otras presiones (por ejemplo, la contaminación o la escorrentía de sedimentos).
- b. Las estrategias de largo plazo que podrían contribuir a la adaptación de la biodiversidad se concentran en la expansión de reservas que podrían colaborar a disminuir la vulnerabilidad del ecosistema al cambio climático. De este modo, es necesario mantener y desarrollar áreas naturales protegidas, corredores naturales, conservación del suelo, manejo de ecosistemas, monitoreo y conservación *in situ*. Así, es necesario restaurar y mantener una mayor conectividad de áreas naturales protegidas ante el cambio climático lo que implica mantener corredores de biodiversidad como una prioridad.
- c. Asimismo, es necesario reducir y manejar el stress de especies y ecosistemas, asociado a factores distintos al cambio climático tales como la fragmentación, destrucción, sobreexplotación, eutroficación, desertificación y acidificación.
- d. Una política de impuesto sobre el valor agregado ecológico podría contribuir a la conservación de bosques y biodiversidad.

## TURISMO

- a. Medidas técnicas: reciclar agua, colecta de agua de lluvia, plantas de desalinización, estructuras tarifarias del consumo de agua, estructuras resistentes a los ciclones, pronósticos del clima y sistemas de alerta.

- b. Medidas administrativas: planes de conservación del agua, diversificación de productos y mercados, diversificación regional de empresas, redireccionar clientes de zonas de impacto, impulsar la administración ambiental en las empresas (certificaciones), ajustar las primas de las pólizas de aseguración.
- c. Educación: educación en conservación del agua entre empleados y huéspedes, campañas de conservación del agua.

#### EVENTOS EXTREMOS Y COSTAS

- a. Desarrollar la infraestructura para mitigar los impactos climáticos.
- b. Preparación para atender adecuadamente los eventos extremos.

#### SALUD

- a. Aplicar políticas específicas para reducir el riesgo de la población más sensible a los impactos climáticos, con especial atención a las grandes ciudades y a los posibles contagios de enfermedades infecciosas en las zonas rurales.

#### INDUSTRIA

- a. Promover la innovación tecnológica.
- b. Establecer costos del CO<sub>2</sub> que incluyan las externalidades negativas.
- c. Aplicar sistemas de incentivos fiscales para las empresas con inversiones para la transformación tecnológica en proporción a las emisiones disminuidas.

#### CONSTRUCCIÓN

- Fijar normas para los edificios públicos para la sustitución de focos y luminarias incandescentes.
- Desarrollar una normatividad para la construcción de vivienda que incorporen criterios de utilización de materiales, aislamiento térmico, equipos e instalaciones ahorradoras de energía, disposición adecuada de desechos, sistemas de recargas y tratamiento de aguas. Ello incluyendo además el apoyo en mecanismos financieros, como las hipotecas verdes y los fideicomisos para el ahorro de energía.
- Fortalecer la normatividad para la construcción de edificaciones verdes para el consumo de energía, disposición de residuos, consumo de agua y su tratamiento, descargas y manejo de desechos.

## 5. CONCLUSIONES

Las principales conclusiones que se desprenden son:

1. La evidencia del deterioro ambiental en México sugiere la necesidad, entre otras cosas, de aplicar una política pública que contribuya, de manera decisiva a revertir esta tendencia. No obstante que en la literatura económica existe una abrumadora mayoría a favor del uso de los instrumentos económicos, existen un conjunto de factores que matizan esta situación y que incluso permiten identificar algunas ventajas en el uso de las regulaciones.
2. Es indispensable combinar, el uso de las regulaciones ambientales con los instrumentos económicos. Ello sin embargo requiere identificar apropiadamente los casos donde cada uno de esos dos mecanismos tiene mejores oportunidades para obtener resultados. En el texto se enumeran distintas áreas y actividades que

permitirían mejorar la dinámica entre estos dos instrumentos.

3. Asimismo, debe reconocerse que la planeación del sector ambiental en México, debe apoyarse en la construcción de un conjunto de indicadores y metas cuantificables. En este sentido, se observa que en México existen avances importantes en materia ambiental pero que ello no es suficiente atendiendo a la persistencia del deterioro ambiental. Por ello, es indispensable avanzar en una mayor complementariedad de los distintos instrumentos que están disponibles. En el caso concreto de los impactos potenciales del cambio climático en México, la estrategia de mitigación debe tener en cuenta las siguientes consideraciones:
4. La existencia de las externalidades, así como de los costos de mitigación supone una relación entre las políticas económicas y las ambientales, que trascienda las fallas de coordinación y de integración que hasta ahora han prevalecido en México. La aplicación de instrumentos económicos para fines ambientales ha sido más bien casuística, a pesar de las ventajas demostradas que suponen dichos instrumentos, y a pesar también de que están previstos de distintas formas en la legislación desde la última década del pasado siglo.
5. La modificación de precios de la energía y la aplicación de mecanismos de mercado no resolverían por sí mismas las necesidades de mitigación de emisiones, pero también muestra que sin dichas políticas no será posible alcanzar las metas de mitigación que requiere la estrategia de cambio climático. Por ello, se impone como prioridad un cambio tanto de concepción como de operación de las políticas económico-ambientales, en especial las de tipo fiscal relacionada con el consumo de energía.
6. México enfrentará en las próximas décadas una mayor necesidad de aplicar una política científica y tecnológica alineada con las exigencias de la mitigación de emisiones de efecto invernadero. Si bien existe acceso a una gama amplia de tecnologías disponibles para mejorar la eficiencia, a mediano plazo se requerirá la introducción de tecnologías no disponibles, sobre todo en la producción de energías alternas y no renovables, pero también en los demás sectores clave para la mitigación.
7. Existen señales contradictorias y erróneas, en cuanto a los objetivos de mitigación y protección del medio ambiente. Existen una serie de subsidios, tarifas privilegiadas y políticas de precios fijos que hacen que los sectores productivos carezcan de incentivos para mejorar su desempeño. Mientras los costos de producción no reflejen los costos sociales del consumo de combustibles de origen fósil y de la emisión de gases de efecto invernadero, los sectores industrial, agropecuario o de transporte no tendrán incentivos suficientes para mejorar su desempeño ambiental.
8. Además de la supresión de subsidios e incentivos perversos, parece plausible pensar en elevar los niveles de exigencia actuales respecto al desempeño de ciertas tecnologías e industrias. Resulta poco razonable tener estándares menores, por ejemplo, en la industria automotriz, cuando las compañías ofrecen autos que satisfacen una exigencia de desempeño mucho mayor en mercados como Estados Unidos o Japón. Si la tecnología existe, en México deben establecerse estándares de desempeño tan altos como en el mercado internacional.
9. El reforzamiento del marco reglamentario pasa también por el otorgamiento de mayores atribuciones a las instancias idóneas para verificar la observancia de normas y leyes. Instancias como la CONAE, la PROFEPA o incluso las mismas SEDESOL y SEMARNAT, tendrán dificultades para trascender la emisión de recomendaciones mientras se sigan enfrentando a los dictados de mayor peso de otros sectores.
10. Las herramientas con que se dispone actualmente para hacer cumplir las normas son extremadamente débiles y su observación, por el resto de las instancias de gobierno queda en muchos casos sujeta a la voluntad política o a la conveniencia coyuntural. La orientación y observancia de la política nacional de cambio climático debería estar regida por una instancia con las atribuciones legales y el control presupuestario suficientes. Esto significa construir una instancia gubernamental con la capacidad adecuada para ello.

## REFERENCIAS

- Achard, F., H.D. Eva, H.J. Stibig, P. Mayaux, J. Gallego, T. Richards, and J.P. Malingreau. 2002. Determination of Deforestation Rates of the World's Humid Tropical Forests. *Science*, 297:999-1002.
- Adams R.M., B.H. Hurd, S. Lenhart, N. Leary (1998). "Effects of global climate change on agriculture: an interpretative review". *Climate Res.* 11, 19-30.
- Adams, R.M., B.A. McCarl and L.O. Mearns, (2003): The effects of spatial scale of climate scenarios on economic assessments: an example from US agriculture. *Climatic Change*, 60, 131-148.
- Adams, Richard M. (1989): "Global Climate Change and Agriculture: An Economic Perspective," *American Journal of Agricultural Economics*, 71: 1272-9.
- Adger, W.N., K. Brown, R. Cervigni y D. Moran. (1995). "Towards Estimating Total economic value of forest in Mexico"; *Ambio*, 24: 286-296.
- Aggarwal P. K. and R. K. Mall (2002) "Climate change and rice yields in diverse agro-environments of india. ii. effect of uncertainties in scenarios and crop models on impact assessment" *Climatic Change* 52 pages 331-343
- AGROASEMEX, (2008), "El riesgo en el sector agropecuario: una aproximación empírica", Documento de Trabajo.
- Aguilar, E; Peterson, T; Obando, P; Frutos, R; Retana, J; Solera, M; Soley, J; García, I; Araujo, R; Santos, A; Valle, V; Brunet, M; Aguilar, L; Álvarez, L; Bautista, M; Castañón, C; Herrera, L; Ruano, E; Sinay, J; Sánchez, E; Oviedo, G; Obed, F; Salgado, J; Vázquez, J; Baca, M; Gutiérrez, M; Centella, C; Espinosa, J; Martínez, D; Olmedo, B; Espinoza, C; Núñez, R; Haylock, M; Benavides, H y Mayorga, R. 2005. Changes in Precipitation and Temperature Extremes in Central America and Northern South America, 1961-2003, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 10, D23107
- Ainsworth, E.A., A. Rogers, R. Nelson and S.P. Long, 2004: Testing the source-sink hypothesis of down-regulation of photosynthesis in elevated CO<sub>2</sub> in the field with single gene substitutions in *Glycine max*. *Agr. Forest Meteorol.*, 122, 85-94.
- Alexander, C. (2005), *Market Models: A guide to Financial Data Analysis*, The Business School for Financial Markets.
- Alix-García, J. 2007. A spatial analysis of common property deforestation. *Journal of Environmental Economics and Management*, 53:141-157
- Alix-García, J., A. de Janvry, and E. Sadoulet. 2005. A tale of two communities : Explaining deforestation in Mexico. *World Development*, 33(2):219-235.
- Allan J. D. y A. S. Flecker (1993) "Biodiversity conservation in running waters". *BioScience* 43: 32-43
- Allan, J. D., M.A. Palmer y N.L. Poff. (2005). "Climate change y freshwater ecosystems". Pp. 272-290. in T.E. Lovejoy y L. Hannah (eds.), *Climate Change and Biodiversity*. Yale University Press, New Haven CT.
- Alley R. B., J. Marotzke, W. D. Nordaus, J. T. Overpeck, D. M. Peteet, R. A. Pielke, Jr. R. T. Pierrehumbert, P.B. Rhines, T. H. Stocker, L. D. Talley, y J. M. Wallace (2001) "Abrupt climate change". *Science* 299: 2005-2010.
- Amthor, Jeffrey S, (2001) "Effects of atmospheric CO<sub>2</sub> concentration on wheat yield: review of results from experiments using various approaches to control CO<sub>2</sub> concentration" *Field Crops Research* 73 pages, 1-34
- Andersen, L.E., 1996. The causes of deforestation in the Brazilian Amazon. *Journal of Environmental Development* 5, 309-328.
- Ando, M., S. Yamamoto and S. Asanuma, (2004) "Global warming and heatstroke". *Japan J. Biometeorol.*, 41, 45.
- Ang, B. W. (1993). "Sector disaggregation, structural effect and industrial energy use: An approach to analyze the interrelationships," *Energy* 18(10): 1033-1044.



- Angelsen, A. Kaimowitz, D. (1999). *Economic Models of Tropical Deforestation -a Review*. Indonesia: Centre for International Forestry Research –CIFOR.
- Antle John M., Capalbo Susan M., Elliott Edward t. and Keith H. Paustian (2004) "Adaptation, spatial heterogeneity, and the vulnerability of agricultural systems to climate change and co2 fertilization: an integrated assessment approach" *Climatic Change* 64 pages 289–315
- Antle, J. M. (1987), "Econometric Estimation of Producers' Risk Attitudes", *Agricultural Economics*, 69, pp. 509-522.
- Arnell, N.W., M.G.R. Cannell, M. Hulme, R.S. Kovats, J.F.B. Mitchell, R.J.Nicholls, M.L. Parry, M.T.J. Livermore and A. White, (2002): *The consequences of CO2 stabilisation for the impacts of climate change*. *Climatic Change*, 53, 413-446.
- Arriaga Laura y Leticia Gómez (2004) "Posibles efectos del cambio climático en algunos componentes de la biodiversidad de México" INE, SEMARNAT.
- Arroyo M. T. K., J. J. Armesto, F. Squeo y J. Gutierrez (1993) "Global Change: Flora y vegetation of Chile". In: *Earth System responses to Global Change, Contrasts between North y South America*, pp. 239-264 eds. H. A. Mooney, E. R. Fuentes y B. I. Kronberg San Diego: Academic Press.
- Asociación Mexicana de Arte y Cultura Popular, A.C. (2008) "Conservación del palo fierro en Sonora y uso integral de maderas duras de Quintana Roo" en: *Aspectos económicos sobre la biodiversidad de México*; Hesiquio Benítez Díaz, Eduardo vega López, Arturo Peña Jiménez y Sophie Ávila Foucat (editores); INE, SEMARNAT, CONABIO
- Ávila Forcada, S., A. Guevara Sanginés y C. Muñoz Piña (2008) "Cómo evitar el agotamiento de los acuíferos en México: Análisis del desacoplamiento del subsidio a la tarifa eléctrica de bombeo agrícola", en H. Guerrero García Rojas, A. Yúnez Naude y J. Medellín Azuara, coords., *El agua en México: Implicaciones de las políticas de intervención en el sector*. México: Fondo de Cultura Económica, *Lecturas de El Trimestre Económico*, No. 100.
- Ávila Foucat Sophie y Laura Saad Alvarado (1998) "Valuación de la ballena gris (*Eschrichtius robustus*) y la ballena jorobada (*Megaptera novaeangliae*) en México" en: *Aspectos económicos sobre la biodiversidad de México*; Hesiquio Benítez Díaz, Eduardo vega López, Arturo Peña Jiménez y Sophie Ávila Foucat (editores); INE, SEMARNAT, CONABIO.
- Ávila-Foucat, S. (2006), *Importancia económica del uso de la vida silvestre en México*. Reporte técnico. CONABIO, México
- Ayer, H.W. y P.G. Hoyt, (1981), "Crop- water production functions: economic implications for Arizona", *Rev Technical Bulletin Number 242*, Agricultural Experiment Station.
- Aylward, B. (1993). "The Economic Value of Pharmaceutical Prospecting y its Role in Biodiversity Conservation". *LEEC Discussion Paper No. 93-05*. London: International Institute for Environment y Development.
- Ayres M. P. y M. J. Lombardero (2000) "Assessing the consequences of global change for forest disturbance from herbivores y pathogens". *The Science of the Total Environment* 262: 263-286
- Azqueta D. (1995) "La Valorización económica de la calidad ambiental" McGraw Hill, España.
- Baird JK, Masbar S, Basri H, Tirtokusumo S, Subianto B, Hoffman SL. (1998) "Age-dependent susceptibility to severe disease with primary exposure to *Plasmodium falciparum*". *J Infect Dis*; 178:592-5.
- Baker, T., H. Pan, J. Kohler, R. Warren, and S. Winne, (2006): "Avoiding Dangerous Climate Change by Inducing Technological Progress: Scenarios Using a Large-Scale Econometric Model". In *Avoiding Dangerous Climate Change*, H.J. Schellnhuber (editor in chief), Cambridge University Press, pp. 361-371.
- Baker, W., 1989. A review of models of landscape change. *Landscape Ecol.* 2, 111–133.
- Bale J. S., G. J. Masters, I. D. Hodkinson, C. Awmack, T. M. Bezemer, V. K. Brown, J. Butterfield, A. Buse, J. C. Coulson, J. Farrar, J. E. G. Good, R. Harrington, S. Hartley, T. H. Jones, R. L. Lindroth, M. C. Press, I. Symriondis, A. D. Watt, y J. B. Whittaker (2002) "Herbivory in global climate change research: direct effects of rising temperature on insect herbivories". *Global Change Biology* 8: 1-16.



- Balmford Andrew, Aaron Bruner, Philip Cooper, Robert Costanza, Stephen Farber, Rhys E. Green<sup>1</sup>, Martin Jenkins, Paul Jefferiss, Valma Jessamy, Joah Madden, Kat Munro, Norman Myers, Shahid Naeem, Jouni Paavola, Matthew Rayment, Sergio Rosendo, Joan Roughgarden, Kate Trumper, y R. Kerry Turner (2002) "Economic reasons for conserving wild nature" *Science* 297 (5583): 950-953
- Balster, H. 2000. Markov chain models for vegetation dynamics. *Ecological Modelling* 126(3):139-154.
- Banco de México. [www.banxico.org.mx](http://www.banxico.org.mx)
- Barlow, J., T. Hugaasen, y C. A. Peres. (2002). "Effects of ground fires on understory bird assemblages in Amazonian forests". *Biological Conservation* 105:157-169.
- Barnett, T.P. (1977), An attempt to verify some theories of El Niño : *Journal of Physical Oceanography*, vol.7, no.5, p. 633-47.
- Barnett, T.P., D.W. Pierce, K.M. AchutaRao, P.J. Geckler, B.D. Santer, J.M. Gregory, y W.M. Washington (2005). "Penetration of human-induced warming into the world's oceans". *Science* 309: 284-287
- Barry J. P., C. H. Baxter, R. D. Sagarin, y S. E. Gilman (1995) "Climate-related long-term faunal changes in a California rocky intertidal community". *Science* 267-275
- Bartiaux, F. and van Ypersele, J.P.: (1993), "The role of population growth in global warming", in *International Population Conference/Congres International de la Population, Montreal 1993, 24 August* compiled by: International Union for the Scientific Study of Population (IUSSP), Liege, Belgium 4.
- Basu, R. and J.M. Samet, (2002) "Relation between elevated ambient temperature and mortality: a review of the epidemiologic evidence". *Epidemiol. Rev.*, 24, 190-202.
- Bateman, I.J., Willis, K.G., Garrod, G.D., Doktor, P., Langford, I., Turner, R.K., (1993). "Recreation y environmental preservation value of the Norfolk broads: a contingent valuation study, report to the national rivers authority, environmental appraisal group", University of East Anglia.
- Bauer L.S. (1995), Resistance: "A Threat to the Insecticidal Crystal Proteins of *Bacillus thuringiensis*", *Florida Entomologist* 78: 414-443
- Beaubien E.G., H.J. Freeland (2000) "Spring phenology trends in Alberta, Canada: links to ocean temperature". *Int J Biometeorol* 44:53-59
- Bell, M.L., F. Dominici and J.M. Samet, (2005): "Ameta-analysis of time-series studies of ozone and mortality with comparison to the national morbidity, mortality, and air pollution study". *Epidemiology*, 16, 436-445.
- Bellón, M.R., O.R. Masera, y G. Segura. (1993). "Response options for sequestering carbon in Mexican forests"; Reporte al F-7 International Network on tropical Forestry y Global Climatic Change, Energy y Environment Division, Lawrence-Berkeley Laboratory, Environmental Protection Agency, Berkeley.
- Benabdellah B., K.F. Albrecht, V.L. Pomaz, E.A. Denisenko, D.O. Logofet. (2003). Markov chain models for forest successions in the Erzgebirge, Germany. *Ecological Modelling* 159: 145-/160
- Benke A. C. (1990) "A perspective on America's vanishing streams". *Journal of the North American Benthological Society* 9: 77-78
- Bennett, E.L. y C.J. Reynolds. (1993). "The Value of a Mangrove Area in Sarawak". *Biodiversity y Conservation* 2(4): 359-375.
- Berck P. (1979) "The economics of timber: A renewable resource in the long run". *Bell Journal of economics* 10: 447-462.
- Berry, M. W., R. O. Flamm, B. C. Hazen, y R. L. MacIntyre 1996. «The Land-Use Change and Analysis System (LUCAS) for Evaluating Landscape Management Decisions». *IEEE Computational Science & Engineering* 3(1): 24-35.
- Betts R. A. P. M., Cox M. Collins, P. P. Harris, C. Huntingford y C. D. Jones (2004) "The role of ecosystem-atmosphere interactions in simulated Amazonian precipitation decrease y forest dieback under global climate warming". *Theoretical y Applied Climatology*.

- Bigano, A. et al. (2006), "The Impact of Climate on Holiday Destination Choice", *Climatic Change*, 76 (3-4), pp. 389-406..
- Binswanger, H.P. (1980), "Attitudes Toward Risk: Experimental Measurement in Rural India", *American Journal of Agricultural Economics*, 62, pp. 394-407.
- Birdsey, R. A., L. S., Heath (1995) "Carbon changes in U.S. forests. Pages 56-70" In: Joyce, L. A. ed.. *Productivity of America's forests y climate change*. General Technical Report RM-271., USDA Forest Service, Fort Collins, Colorado
- Bitran, D. (2001), *Características del impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en México en el periodo 1980-1999*, CENAPRED.
- Black, F. (1976), *Studies in Stock Price Volatility Changes*, Proceeding of the 1976 Business Meeting of the Business and Economics Statistics, American Statistics Association.
- Blanchard, O. (1997): *Macroeconomía*, Prentice Hall Iberia, Madrid.
- Bogan A. E. (1996) "Decline y decimation: the extirpation of the unionid bivalves of North America". *Journal of Shellfish Research* 15: 484
- Boggess W.G., G.D. Lynne, J.W. Jones y D.P. Swaney (1983), "Risk-return assessment of irrigation decisions in sumid regions" *Southern Journal of Agricultural Economics*. 15, 135-142.
- Bolker, B.M., S.W. Pacala, F.A. Bazzaz, C D. Canham, and S.A. Levin. 2006. Species diversity and ecosystem response to carbon dioxide fertilization: conclusions from a temperate forest model. *Global Change Biology*, 1(5): 373 - 381
- Bollerslev Tim y Eric Ghysels (1994). On Periodic Autoregressive Conditional Heteroskedasticity, *Scientific Series*, núm. 94s-3.
- Bongaarts, John. (1992). "Population Growth and Global Warming." *Population and Development Review* 18:299-319.
- Borja-Aburto, V., Loomis, D., Bangdiwala, S. Shy, C., Rascon-Pacheco, R. (1997) "Ozone, Suspended Particulates, and Daily Mortality in Mexico City". *American Journal of Epidemiology*, 145: 258-268.
- Borman, F.H., y G.E. Likens, (1967), "Nutrient cycles", *Science*, 155: 424-429.
- Borrell, C., Dell'Ol Bartiaux, mo, M., Rodríguez-Sanz, M., Garcia-Olalla, P., Caylá, J., Benach, J., Muntaner, C. (2006) "Socioeconomic position and excess mortality during the heat wave of 2003 in Barcelona". *European Journal of Epidemiology*; 1:633-640.
- Boyd James, Spencer Banzhaf (2007) "What are ecosystem services? The need for standardized environmental accounting units". *Ecological Economics* 63: 616-626.
- Bradshaw, W. E. y C.M. Holzapfel, (2006) "Climate change: evolutionary response to rapid climate change". *Science*, 312, 1477-1478.
- Brander, L.M., Van Beukering, P.V., Cesar, H. (2007). "The recreational value of coral reef : a meta analysis". *Ecological Economics*, 63: 209-218.
- Bray, D.B and Leticia Merino Pérez. 2004. *La experiencia de las comunidades forestales en México: Veinticinco años de silvicultura y construcción de empresas forestales comunitarias*. Mexico City: Instituto Nacional de Ecología
- Bray, D.B., L. Merino-Pérez, D. Barry (eds). 2005a. *The Community Forests of Mexico: Managing for Sustainable Landscape*. University of Texas Press: Austin, TX
- Brooks T., R. A. Mittermeier, C. G. Mittermeier, G. A.B. da Fonseca, A. B Rylands, W. R Konstant, P. Flick, J. Pilgrim, S. Oldfield, G. Magin, C. Hilton-Taylor. (2002) "Habitat Loss y Extinction in the Hotspots of Biodiversity" *Conservation Biology* 16 (4): 909-923

- Brooks, C. (2002), *Introductory Econometrics for Finance* Econometrics, Cambridge University Press
- Brown, R.A. and N.J. Rosenberg, (1999): Climate change impacts on the potential productivity of corn and winter wheat in their primary United States growing regions. *Climatic Change*, 41, 73-107.
- Bruce JP, Frome M, Haites E, Janzen H, Lal R, Paustian K. (1999). "Carbon sequestration in soils". *Journal of Soil y Water Conservation* 54: 382-389
- Bruinsma, J., 2003: *World Agriculture: Towards 2015/2030: an FAO perspective*. Earthscan, London and FAO, Rome, London, 432 pp.
- Buddemeier, R.W., J.A. Kleyvas y R.B.Aronson, (2004): "Coral Reefs y Global Climate Change: Potential Contributions of Climate Change to Stresses on Coral Reef Ecosystems". Pew Center on Global Climatic Change, Arlington, Virginia, pp.44.
- Bufofali, J. J., P. L. Finkelstein, and E. C. Durman (1989), Air quality, in *The Potential Effects of Global Climate Change on the United States*, pp. 195- 213, Environ. Protect. Agency, Washington, D. C.
- Bugmann, H. y C. Pfister, (2000): "Impacts of interannual climate variability on past y future forest composition". *Reg. Environ. Change*, 1: 112-125.
- Burkett, Paul (2005) "Marx's vision of sustainable human development." *Monthly Review*, October, pp. 32-64.
- Bush M. B. (2002b) "On the interpretation of fossil Poaceae pollen in the humid lowland neotropics *Palaeogeography, Palaeoclimatology*", *Palaeoecology* 117: 5-17
- Bush M. V., M. R. Silman, y D. H. Urrego (2004) "48000 years of climate y forest change in a biodiversity hot spot", *Science* 303: 827-829
- Buzas M. A., y S. J. Cluver (1994) *Species Pool y dynamics of marine paleocommunities*. *Palaios* 13: 263-275.
- Caballer V. Y N. Guadalajara, (1998). *Valoración Económica del agua de riego*. Ed. Mundi Prensa.
- Cahoon, D.R., and Hensel, P., (2002) "Hurricane Mitch: a regional perspective on mangrove damage, recovery and sustainability": USGS Open File Report.
- Cairns MA, Haggerty PK, Alvarez R et al. (2000) *Tropical Mexico's recent land-use change: a region's contribution to the global carbon cycle*. *Ecological Applications* 10, 1426-41.
- Cakmak, S., Dales, R., Blanco, C. (2007) "Air Pollution and Mortality in Chile: Susceptibility among the Elderly". *Environmental Health Perspectives*; 115: 524-527.
- Caldeira, K. y M.E. Wickett, (2003) "Anthropogenic carbon y ocean pH". *Nature*, 425, 365-365.
- Calleri G, Lipani F, Macor A, Belloro S, Riva G, Caramello P. (1998) "Severe and complicated falciparum malaria in Italian travelers". *J Travel Med*; 5:39-41.
- Campbell, D., Woodruff, R. (2006) "Comparative Risk Assessment of the Burden of Disease from Climate Change". *Environmental Health Perspectives*; 114: 1935-1941.
- Carabias, J. Y R. Landa (2005), *Agua, Medio Ambiente y Sociedad. Hacia la gestión integral de los recursos hídricos en México*, UNAM Colegio de México y Fundación Gonzalo Río Arronte I, A. P., México
- Carlson A. G., D. Zilberman y J.A. Miranowsky (1993), *Agricultural and Environmental Resource Economics*. Oxford.
- Carpenter, S., P. Pingali, E. Bennett y M. Zurek, Eds., (2005) "Ecosystems y Human Well-being: Volume 2 Scenarios". Island Press, Washington, District of Columbia, 560 pp.
- Carson, R.T., Wilks, L., Imber, D., (1994). "Valuing the preservation of Australia's Kakadu conservation zone". *Oxford economic papers*. Oxford 46 (5), 727-749.
- Carson, R.T., Y. Jeon y D.R. McCubbin (1999), "The relationship between air pollution emissions and income: U.S. data", *Environment and Development Economics*, 2, 433-450.

- Ceballos, G. (1993). "Especies en peligro de extinción". En: Flores, O. y A. Navarro (comps.). *Biología y problemática de los vertebrados en México*, núm. especial de la revista *Ciencias*, 7, pp. 5-10.
- Cedeño-Sánchez, O. (2001), Situación actual sobre los incendios forestales y sus principales causas. In: *Memoria del II Foro Internacional sobre los Aprovechamientos Forestales en Selvas y su Relación con el Ambiente*. SEMARNAT-FAO-Gob. Estado de Veracruz. pp: 235-252
- CENAPRED (2008), [www.cenapred.unam.mx](http://www.cenapred.unam.mx); Centro Nacional de Prevención de Desastres
- CEPAL (2008), *Estudio Económico de América Latina y el Caribe, 2007-2008*, Comisión Económica para América Latina y el Caribe.
- Cesar, H., L. Burke y L. Pet-Soede, (2003): "The Economics of Worldwide Coral Reef Degradation". Cesar Environmental Economics Consulting (CEEC), Arnhem, 23 pp.
- Cesar, H., X. Olsthoorn, et al. (2002), "Improving Air Quality in Metropolitan Mexico City: An Economic Valuation. México, DF", World Bank, Policy Research Working Paper #2785.
- CESTUR (2001). Estudio estratégico de viabilidad del segmento de ecoturismo en México. [http://www.sectur.gob.mx/wb2/sectur/sect\\_9190\\_ecoturismo\\_en\\_mexico](http://www.sectur.gob.mx/wb2/sectur/sect_9190_ecoturismo_en_mexico)
- Chang C.C. (2002), "The potencial impact of climate change on Taiwan's agriculture", *Agricultural Economics*, 27: 51-64.
- Chavas, J.P. y M.T. Holt (1990), "Acreage Decisions Under Risk: The Case of Corn and Soybeans", *American Journal of Agricultural Economics*, 72, pp. 529-538.
- Chee Yung En (2004) "An ecological perspective on the valuation of ecosystem services". *Biological Conservation* 120. 549-565
- Chen Ya-ning, LI Wei-hong, Xu Chang-chun y Hao Xin-ming (2007), "Effects of climate change on water resources in Tarim River Basin, Northwest China", *Journal of Environmental Sciences*, 19, pp. 488-493
- Chiotti Q.P. y T. Johnston, (1995), "Extending the boundaries of climate change research: A discusión on agriculture. *Journal of Rural Studies*.
- Chmielewski, F.M. y T. Rotzer, (2001) "Response of tree phenology to climate change across Europe". *Agr. Forest Meteorol.*, 108, 101-112.
- Choi, G.Y., J.N. Choi and H.J. Kwon, (2005) "The impact of high apparent temperature on the increase of summertime disease-related mortality in Seoul: 1991- 2000". *J. Prev. Med. Pub. Health*, 38, 283-290.
- Chomitz, K. M and D.A. Gray (1996). *Roads, Land Use, and Deforestation: A Spatial Model Applied to Belize*. World Bank Economic Review, 10: 487-512
- Church J.A., Gregory, J.M., Huybrechts, P., Kuhn, M., Lambeck, K., Nhuan, M.T., Qin, D. and Woodworth, P.L. (2001).
- Cincotta, R. P., J. Winsnewski, y R. Engelman (2000), Human population in the biodiversity hotspots. *Nature*, 404: 990-991.
- Clarke A. (1993) "Temperature y extinction in the sea: A physiologist's view". *Paleobiology* 19: 499-518
- Cleveland, C. J. y Ruth, M., (1996). ¿Cuándo, dónde y por cuánto los límites biofísicos restringen el proceso económico? Una investigación sobre la contribución de GeorgescuRoegen a la economía ecológica. Traducción de Ramón Alonso Berrío. En: *Economía ¿Ecológica?* Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Cline W. (1992), *The economics of global warming*, Washington D.C.: Institute of International Economics.
- Coase, R. (1960) "The Problem of Social Cost", *Journal of Law y Economics* 3, , pp. 1-44.
- Cochrane M. A., A. Alencar, M. D. Schulze, C. M. Souza Jr., D. C. Nepstad, P. Lefebvre, y E. Davidson (1999). "Positive feedbacks in the fire dynamic of closed canopy tropical forests". *Science* 284: 1832-1835

- Cochrane M. A., y M. D. Schulze (1999) "Fire as a recurrent event in tropical forest of the eastern Amazon: Effects on forest structure, biomass y species composition". *Biotropica* 31(1) 2-16
- Cochrane, M.A. (2001). "Synergistic Interactions Between Habitat Fragmentation y Fire in Evergreen Tropical Forests". *Conservation Biology* 15 (6): 1515-1521.
- Cole, J., (2003) "Global change: dishing the dirt on coral reefs". *Nature*, 421, 705-706.
- Comes HP y Kadereit JW (1998), "The effect of Quarternary climatic changes on plant distribution y evolution". *Trends in Plant Science*. 3, 432-438
- CONABIO, (2006). *Capital natural y bienestar social*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México.
- CONABIO, (2007) "Diversidad biológica marina y costera en México".
- CONABIO, Comisión Nacional para el uso de la Biodiversidad (1998). "La diversidad biológica de México: Estudio de País". Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México.
- CONAGUA (2007) "Estadísticas del agua en México" ed. 2007 Comisión Nacional del Agua, SEMARNAT
- CONAGUA (2008) "Estadísticas del Agua en México" ed. 2008. Comisión Nacional del Agua, SEMARNAT
- CONANP - Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2007), Programa de Turismo en Áreas Naturales Protegidas 2007 -2012. México D.F. 14 pp.
- CONAPO (2007,2008) Comisión Nacional de Población.
- Conde, C. and K. Lonsdale, (2004): *Engaging stakeholders in the adaptation process. Adaptation Policy Frameworks for Climate Change: Developing Strategies, Policies and Measures*, B. Lim and E. Spanger-Siegfried, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 47-66.
- Conde, C., D. Liverman, M. Flores, R. M. Ferrer, R. Araujo, E. Betancourt, G. Villarreal, C. Gay. 1997. Vulnerability of rainfed maize crops in Mexico to Climate Change. *Clim. Res.* 9, 1: 17-23.
- Conde, C., Gay, C., Sánchez, O., (2006). "Escenarios de Cambio Climático para México. Temperatura y Precipitación".
- Constanza Robert, Ralph d'Arge , Rudolf de Groot, Stephen Farber, Monica Grasso, Bruce Hannon, Karin Limburg, Shahid Naeem, Robert V. O'Neill, Jose Paruelo, Robert G. Raskin, Paul Sutton, Marjan van den Belt. (1998) "The value of the world's ecosystem services y natural capital". *Ecological Economics* 25; 3-15.
- Constanza, R., Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R. V., Paruelo, J., Raskin, R. G., Sutton, P. y van den Belt, M. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387: 253-260. Daily, G.C., (1997). Introduction: what are ecosystem services? In: Daily, G.C. Ed. 1997. *Nature's Services, Societal Dependence on Natural Ecosystems* Island Press, Washington, DC.
- Constanza, R., M. Daly, C. Folke, P. Hawken, C. S. Holling, A. J. McMichael, D. Pimentel, y D. Rapport. (2000). "Managing our environmental portfolio". *Bioscience* 50:149-155.
- Cordero C. y E. Morales (1998). "Panorama de la biodiversidad de México". Conabio, México, manuscrito.
- Corwin, A.L., R.P. Larasati, M.J. Bangs, S. Wuryadi, S. Arjoso, N. Sukri, E. Listyaningsih, S. Hartati, R. Namursa, Z. Anwar, S. Chandra, B. Loho, H. Ahmad, J.R. Campbell and K.R. Porter, (2001) "Epidemic dengue transmission in southern Sumatra, Indonesia". *T. Roy. Soc. Trop. Med. H.*, 95, 257-265.
- Costa M. H., y J. A. Foley (2000) "Combined effects of deforestation y doubled atmospheric CO2 concentrations on the climate of Amazonia". *Journal of climate* 13: 18-34
- Cox P. M., R.A. Betts, C. A. Jones, S. A. Spall y I. J. Totterdell (2001) "Modelling vegetation y the carbon cycle as interactive elements of the climate system". In R. Pearce ed. *Meteorology at the Millenium*. London: Academic Press.



- Cropper, M, and C. Griffiths. 1994. The interaction of population growth and environmental quality. *American Economic Review*, 84:250–254
- CSERGE, (1993). Annexes 3-6. "Economic value of carbon sequestration, watershed protection, value of pharmaceuticals from Mexico's forests, existence value"; Draft report to World Bank Latin America y the Caribbean-Country Department II. Mexico Forestry y Conservation Sector Review. Substudy of economic valuation of forests. Center for Social y Economic Research on the Global Environment.
- Cuarón, A.D. (2000) Effects of Land-Cover Changes on Mammals in a Neotropical Region: a Modeling Approach. *Conservation Biology* 14 (6):1676–1692
- Cuthbertson K., (1996), *Quantitative Financial Economics*, Published by John Wiley & Sons.
- d'Arge (editor), (1975), *Economic and Social Measures of Biological and Climate Change*, Vol. 6, *Climate Impact Assessment Program*, US Department of Transport.
- D'Souza, R., N. Becker, G. Hall and K.Moodie, (2004) "Does ambient temperature affect foodborne disease?" *Epidemiology*, 15, 86-92.
- Daily Gretchen C., Tore Söderqvist, Sara Aniyar, Kenneth Arrow, Partha Dasgupta, Paul R. Ehrlich, Carl Folke, AnnMari Jansson, Bengt-Owe Jansson, Nils Kautsky, Simon Levin, Jane Lubchenco, Karl-Göran Mäler, David Simpson, David Starrett, David Tilman, Brian Walker (2008) "The Value of Nature y the Nature of Value" *Science magazine* 289 (5478) pp.395.
- Daniel, M., V. Danielov B. K. A. Jirsa y J. Noži ka, (2003) "Shift of the tick *Ixodes ricinus* y tick-borne encephalitis to higher altitudes in central Europe". *Eur. J. Clin. Microbiol.*, 22, 327-328.
- Dasgupta, p. y Maler, K. G. (2000). Net National Product, Wealth, and Social wellbeing. *Environment and Development Economics* 5(1&2): 69-93.
- Dasgupta, P. y Maler, K. G. (1997). "The resource basis of production y consumption: an economic analysis". pp 1-32, In: Dasgupta, P. y Maler, K. G. (Editors) *The Environment y Emerging Development Issues*, Volume 1. Clarendon Press, Oxford.
- Davies, Z.G., R.J.Wilson, S. Coles y C.D. Thomas, (2006): "Changing habitat associations of a thermally constrained species, the silver-spotted skipper butterfly, in response to climate warming". *J. Anim. Ecol.*, 75, 247-256.
- Davis A. J., Jenkinson J. H Lawton, B. Shorrocks, y S. Wood (1998) "Making mistakes when predicting shifts in species range in response to global warming". *Nature* 391: 783-786
- Davis, M.A., J.P. Grime y K. Thompson, (2000) "Fluctuating resources in plant communities: a general theory of invisibility". *Journal of Ecology*, 88, 528-534.
- de Groot Rudolf (2006) "Function-analysis y valuation as a tool to assess land use conflicts in planning for sustainable, multi-functional landscapes" en: *Landscape and Urban Planning* 75. 175–186
- de Jong H. J. Bernardus, Omar Masera y Tomás Hernández-Tejada (2004) "Opciones de captura de carbono en el sector forestal" INE, SEMARNAT.
- de Jong, P. W. y P. M. Brakefield (1998) "Climate y change in clines for melanism in the twospot ladybird; *Adalia bipunctata* (Coleoptera: Coccinellidae)". *Proceedings of the Royal Society London* 265: 39-43
- De Mastro G. (1993), "Risultati delle prove irrigue in puglia", *Rev. Agricoltura Ricerca* no. 143, 81-86.
- De Miguel Carlos, Xavier L., y Baltasar M. (2006) "Economic Modelling of Climate Change and Energy Policies" Ed. *New Horizons in Environmental Economics*. Series, Wallace E. Oates Henk Folmer.
- Dechert, G., E. Veldkamp, and, I. Anas. 2004. Is soil degradation unrelated to deforestation? Examining soil parameters of land use systems in upland Central Sulawesi, Indonesia. *Plant and Soil*, 265(1-2): 197-209(13)
- Defila, C. y B. Clot, (2001) "Phytophenological trends in Switzerland". *Int. J. Biometeorol.*, 45, 203-207.

- DeFries, R. S. Bounoua, y G. J. Collatz (2002) "Human modification of the landscape y surface climate in the next fifty years". *Global Change Biology* 8: 438-458
- Deininger, K and B.Minten . (2002). Determinants of Deforestation and the Economics of Protection: An Application to Mexico. *Amer. J. Agr. Econ.* 84(4): 943-960
- Deininger, K and B. Minten. (1999). Poverty, policies, and deforestation: the case of Mexico, *Econ. Devel. Cult. Change* 47 (2):313-325.
- Denman, K.L., G. Brasseur, A. Chidthaisong, P. Ciais, P. Cox, R.E. Dickinson, D. Hauglustaine, C. Heinze, E. Holland, D. Jacob, U. Lohmann, S. Ramachandran, P.L. da Silva Dias, S.C. Wofsy y X. Zhang, (2007) "Couplings between changes in the climate system y biogeochemistry". In: S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor y H.L. Miller, (Eds) *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, 499-587.
- Dennis, R.L.H. y Sheeve, T.G. (1989) Butterfly wing morphology variation in the British Isles: the influences of climate, behavioural posture and hostplant habitat. *Biological Journal of the Linnean Society*.
- Deschenes O. y M. Greenstone (2006), "The economic Impacts of climate Change: Evidence from Agriculture profits and Random Fluctuations in Weather",
- Desvousges, W.H., Johnson, F.R., Dunford, R.W., Boyle, K.J., Hudson, S.P., Wilson, K.N., (1993). "Measuring natural resource damages with contingent valuation: tests of validity y reliability". In: Hausman, J.A. (Ed.), *Contingent valuation: a critical assessment, contributions to economic analysis*, Chapter III, North-Holland, New York, US.
- Dev, V., Phookan, S., Sharma, V., Anand, S. (2004) "Physiographic and entomologic risk factors of malaria in Assam, India". *American Journal Tropical Medicine and Hygiene*; 71: 451-456.
- Diario Oficial de la Federación, 29/DIC/1997, Ley Federal de Derechos (2001 y 2008)
- Dickey, D.A. y W.A. Fuller (1981). "Likelihood ratio statistics for autoregressive time series with a unit root", *Econometrica*, 49, 1057-1072.
- Dirzo, R. y O. Maser (1996), "Clasificación y Dinámica de la Vegetación en México. SEMARNAP Criterios y terminología para analizar la deforestación en México, México.
- Doering O.C., J.C. Randolph, J. Southworth y R.A. Pfeifer (2002), *Effects of Climate Change and Variability on Agriculture Production Systems*. Kluwer Academic Publishers.
- Donner, S.D., W.J. Skirving, C.M. Little, M. Oppenheimer y O. Hoegh-Guldberg, (2005) "Global assessment of coral bleaching y required rates of adaptation under climate change". *Global Change Biol.*, 11, 2251-2265.
- Douville, H., F. Chauvin, S. Planton, J.F. Royer, D. Salas-Melia and S. Tyteca, (2002) Sensitivity of the hydrological cycle to increasing amounts of greenhouse gases and aerosols. *Climate Dynamics*, 20, 45-68.
- Downing T.E. (1992) *Climate change and vulnerable places: global food security and country studies in Zimbabwe, Kenya, Senegal and Chile*. Research Report No. 1. Environmental Change Unit, University of Oxford
- Drake B. G., L. Hughes, E. A. Johnson, B. A. Seibel, M. A. Cochrane, V. J. Fabry, D. Rasse, y L. Hannah (2005) "Synergistic Effects" pp. 296-316 In: T.E. Lovejoy y L. Hannah (eds.), *Climate Change y Biodiversity*. Yale University Press, New Haven CT.
- Drake B. G., M. A. Gonzalez-Meler y S.P. Long (1997) "More efficient plants: A consequence of rising atmospheric CO<sub>2</sub>?" *Annual Reviews of Plant Physiology y plant Molecular Biology* 48: 607-637.
- Dupont, D. and Renzetti, S. (2001) "Water's Role in Manufacturing" *Environmental and Resource Economics* 18(4): 411-432.

- Duraiappah, A., S. Naeem, T. Agardi, N. Ash, D. Cooper, S. Díaz, D.P. Faith, G. Mace, J.A. McNeilly, H.A. Mooney, A.A. Oteng-Yeboah, H.M. Pereira, S. Polasky, C. Prip, W.V. Reid, C. Samper, P.J. Schei, R. Scholes, F. Schutyser and A. van Jaarsveld, Eds., (2005) "Ecosystems y Human Well-being: Biodiversity Synthesis". Island Press, Washington, District of Columbia, 100 pp.
- Easterling III. W., Crosson P., Rosenberg N., McKenney M., Katz L. A. y Lemon M, (1993), "Agricultural impacts of and Responses to Climate Change in the Missouri- Iowa, Nebraska-Kansas (MINK) region", *Climate Change*, 24(1,2): 23-62
- Easterling, D.R., G.A. Meehl, C. Parmesan, S.A. Changnon, T.R. Karl y L.O. Mearns, (2000) "Climate extremes: observations, modeling, y impacts". *Science*, 289, 2068-2074.
- Ekström, M., H. J. Fowler, C. G. Kilsby, and P. D. Jones (2005), New estimates of future changes in extreme rainfall across the UK using regional climate model integrations. 2. Future estimates and use in impact studies, *J. Hydrol.*, 300, 234– 251.
- Elizondo Alarcón, Jorge (coord.), *Prospectiva de la demanda de agua en México 2000-2030*, Fundación Gonzalo Río Arronte, IAP y Fundación Javier Barros Sierra, México DF, 2004, 105 pp.
- Emanuel, K. (2006) "Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years", *Nature*, 436, pp. 686–688.
- Engle, R., V. Ng, y M. Rothschild. (1990), "Asset Pricing with a Factor ARCH Covariance Structure? Empirical Estimates for Treasury Bills", *Journal of Econometrics*, 45, pp. 213-237.
- Engle, R.F. (1982), "Autoregressive Conditional Heteroscedasticity with Estimates of the Variance of UK Inflation", *Econometrica*, 50, pp. 987–1008.
- Engle, R.F. y C.W.J. Granger (1987). "Cointegration and error correction: Representation, estimation and testing", *Econometrica*, 55, 251-276.
- Engsted, T. y J. Bentzen (1993). "Expectations, adjustment costs and energy demand", *Resource and Energy Economics*, 15(4), diciembre, 371-385.
- Erasmus, B.F.N., A.S. Van Jaarsveld, S.L. Chown, M. Kshatriya y K.J. Wessels, (2002) "Vulnerability of South African animal taxa to climate change". *Global Change Biol.*, 8, 679-693.
- Erol, U. y E.S.H. Yu (1987), "On the causal relationship between energy and income for industrialized countries", *Journal of Energy Development*, 13, 113-122.
- Estrada, F. y Conde, C. (2008). Selección de modelos de impacto y costos posibles de aplicarse en el estudio de cambio climático en Centroamérica, para los sectores agrícola, recursos hídricos y salud. Contrato CEPAL, México, Num. 12078.
- Estrada, F., Gay, C., Conde, C. (2008). Un nuevo enfoque para la construcción de escenarios probabilísticos de cambio climático. VI Congreso de la Asociación Española de Climatología. Tarragona 8-11 de octubre 2008. Aceptado.
- Evans, J., Levy, J., Hammit, J., Santos-Burgoa, C., Castillejos, M. (2002) "Health Benefits of Air Pollution Control". In *Air quality in the Mexico megacity*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Fankhauser S. (1995), *Valuing Climate Change: the economics of the greenhouse*, Earthscan Publications Ltd, London
- Fearnside, P.M. (2000). "Global warming and tropical land-use change: Greenhouse gas emissions from biomass burning, Decomposition and soils in forest conversion, shifting Cultivation and secondary vegetation". *Climatic Change* 46: 115–158, 2000.
- Feely, R.A., C.L. Sabine, K. Lee, W. Berelson, J. Kleypas, V.J. Fabry y F.J. Millero, (2004) "Impact of anthropogenic CO<sub>2</sub> on the CaCO<sub>3</sub> system in the oceans". *Science*, 305, 362-366.



- Fischer, G., H. van Velthuizen, M. Shah and F.O. Nachtergaele, (2002): Global agro-ecological assessment for agriculture in the 21st century: methodology and results. Research Report RR-02-02. ISBN 3-7045-0141-7., International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, 119 pp and CD-Rom.
- Fisher C. y Morgenstern R. (2005). "Carbon abatement costs. Why the wide range of estimates?" Discussion paper. Resources for the Future. Washington D.C.
- Flannigan, M.D., Stocks, B.J. y Wotton, B.M. (2000), 'Forest fires and climate change', Science of the Total Environment, 262, 221-230.
- Fleischer Aliza, Lichtman Ivgenia and Robert Mendelsohn (2008) "Climate change, irrigation, and Israeli agriculture: Will warming be harmful?" Ecological economics 65, pages 508-515
- Flores, E. M., R. Araujo, E. Betancourt y D. Liverman. (1996). Comportamiento de la superficie potencialmente apta para el cultivo del maíz de temporal ante un cambio climático. Memorias del Segundo Taller de Estudio de País: México. México Ante el Cambio Climático, 8 a 11 mayo, 1996. Pp.179-184. Cuernavaca, Morelos, México.
- Flowers, MD, EL Fiscus, KO Burkey, FL Booker and J-J Dubois. (2007). Photosynthesis, chlorophyll fluorescence, and yield of snap bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes differing in sensitivity to ozone. Environmental and Experimental Botany 61:190-198.
- Food and Agriculture Organization (FAO). 1993. Forest resources assessment (1990). Tropical countries. Forestry paper No. 112. Rome, FAO
- Franco, A.M.A., J.K. Hill, C. Kitchke, Y.C. Collingham, D.B. Roy, R. Fox, B. Huntley y C.D. Thomas, (2006) "Impacts of climate warming y habitat loss on extinctions at species' low-latitude range boundaries". Glob. Change Biol., 12, 1545-1553.
- Frankhauser S.,(1995). Valuing Climate Change. The Economics of the Greenhouse. London: Earthscan.
- Frederick C. Cuny (1983), Disasters and prevention, Oxford University Press, Nueva York, 1983.
- Freeman, A. 2003. The measurement of environmental and resource values. Theory and methods. Second edition. Resources for the future. Washington, D.C. United States. 490 p.
- Gabastou, J.M., C. Pesantes, S. Escalante, Y. Narvaez, E. Vela, L. Garcia, D. Zabala and Z.E. Yadon, (2000): "Characteristics of the cholera epidemic of 1998 in Ecuador during El Niño (in Spanish)." Rev. Panam. Salud Publ., 12, 157-164.
- Gagnon, A.S., A.B.G. Bush and K.E. Smoyer-Tomic, (2001) "Dengue epidemics and the El Niño Southern Oscillation". Climate Res., 19, 35-43.
- Galindo L.M. y Alanís P. (2001), "Los números básicos que determinan el comportamiento de la economía mexicana", Economía Informa, Facultad de Economía. Número 301., México, pp. 42-55.
- Galindo L.M., R. Heres y L. Sánchez (2006), "El tráfico inducido en México: Contribuciones al debate e implicaciones de política pública", Estudios Demográficos y Urbanos, vol. 21, núm. 1, 123-157.
- Galindo, L.M y JI Montesillo (1999). La Demanda de agua Potable en México: Estimaciones Preliminares, Investigación Económica, Vol. LIX, num 227 enero-marzo, México
- Galindo, L.M. (2005), "Short- and long run demand for energy in México: A cointegration approach", Energy Policy, 33, 1179-1185.
- Galindo, L.M. (2008), El Análisis de Costo Beneficio de Aumento de la Eficiencia Vehicular y Biocombustibles, Documento de Trabajo, Instituto Nacional de Ecología (INE).
- Galindo, L.M. (2008), La evaluación de una medida de eficiencia vehicular y el uso de los biocombustibles en México, Documento de trabajo, Instituto Nacional de Ecología (INE).
- Galindo, L.M. y Caballero, K. (2007) "Efectos de la contaminación ambiental: estimaciones preliminares". Documento de trabajo. México.

- Galindo, L.M. y K. Caballero (2007), "El consumo de energía en México y sus efectos en el producto y los precios", *Problemas del Desarrollo*, IIE, UNAM, México, enero-marzo, pp. 127-152
- Galindo, L.M. y L. Sánchez (2005), "El consumo de energía y la economía mexicana: Un análisis empírico con VAR", *Economía Mexicana*, Vol. XIV (2), segundo semestre, 271-298.
- Gallagher, P. (1986), "U.S. Corn Yield Capacity and Probability: Estimation and Forecasting with Non Symmetric Disturbances", *Journal of Agricultural Economics*, 8, January, pp. 109-22.
- Gallagher, P. (1987), "U.S. Soybean Yields: Estimation and Forecasting with Non Symetric Distributions", *American Journal of Agricultural Economics*, 69, November, pp. 796-803.
- Gallup, John Luke and Jeffrey Sachs D. with Andrew D. Mellinger, (1998) *Geography and Economic Development*, in Annual World Bank Conference on Development Economics, The World Bank Washington D.C.
- Galor, O. (1996). "Convergence? Inferences from Theoretical Models," *Economic Journal* Vol. 106, pp.1056-1080.
- Gardner, T.A., I.M. Cote, J.A. Gill, A. Grant y A.R. Watkinson, (2003) "Longterm region-wide declines in Caribbean corals". *Science*, 301, 958-960.
- Gaston, K.J. (2000). "Global patterns in biodiversity". *Nature* 405, 220-227.
- Gay, C., F. Estrada, C. Conde and H. Eakin, 2004. "Impactos potenciales del cambio climático en la agricultura: escenarios de producción de café para el 2050 en Veracruz (México)". *El Clima, Entre el Mar y la Montaña*, J.C. García Córdón, Ed., AEC, UC seriesNo. 4, 651-660.
- Gedney, N., Cox, P.M., Betts, R.A., Boucher, O., Huntingford, C. and Stott, P.A. 2006. Detection of a direct carbon dioxide effect in continental river runoff records. *Nature* 439
- Gibbs, J. P. & Breisch, A. R. (2001). "Climate warming y calling phenology of frogs near Ithaca, New York, 1900-1999". *Conserv. Biol.* 15, 1175-1178
- Gil-Alana LA (2008) Time trend estimation with breaks in temperature time series. *Climatic Change* 89(3-4): 325
- Glasure Y.U. y A.R. Lee (1997), "Cointegration, error correction and the relationship between GNP and energy: the case of South Korea and Singapore", *Resource Energy Economics*, 20, 17-25.
- Glosten, L. R., R. Jagannathan and D. Runkle, "On the Relation between the Expected Value and the Volatility of the Nominal Excess Return on Stocks." *Journal of Finance* 48, 1779-1801, (1993).
- Goldberg, M., Burnett, R., Brook, J., Bailar, J., Valois, M., Vincent, R. (2001) "Associations between Daily Cause-specific Mortality and Concentrations of Ground-level Ozone in Montreal, Quebec". *American Journal of Epidemiology*,; 54: 817-826.
- González-Herrero, A. y C.B. Pratt (1998), "Marketing crises in tourism: Communication strategies in the United States and Spain", *Public Relations Review*, 24(1), 83-97.
- Gössling, S. and Hall, C. M. (2006b), *Uncertainties in Predicting Tourist Travel Flows Based on Models*.
- Grabherr G., M. Gottfried y H. Pauli. (1994). "Climate effects on mountain plants". *Nature* 369: 448
- Greenberg AE, Lobel HO. (1990) "Mortality from Plasmodium falciparum malaria in travelers from the United States, 1959 to 1987". *Ann Intern Med*; 113:326-7.
- Grêt-Regamey Adrienne y Susanne Kytzia (2007) "Integrating the valuation of ecosystem services into the Input-Output economics of an Alpine region" *Ecological Economics*. 63: 786-798
- Guajardo, R.G. y A. Martínez (2004). "Cuantificación del impacto económico de la caza deportiva en el norte de México y perspectivas de desarrollo". *Centro de Investigaciones Económicas, UANL, Vol XLII, No. 250*. 1-17 pp.
- Guinotte, J.M., R.W. Buddemeier y J.A. Kleypas, (2003) "Future coral reef habitat marginality: temporal y spatial effects of climate change in the Pacific basin". *Coral Reefs*, 22, 551-558.

- Hales, S., N. de Wet, J. Maindonald and A. Woodward, (2002): "Potential effect of population and climate changes on global distribution of dengue fever: an empirical model". *Lancet*, 360, 830-834.
- Hales, S., P. Wienstein, Y. Souares and A. Woodward, (1999) "El Nino and the dynamics of vectorborne disease transmission". *Environ. Health Persp.*, 107, 99-102.
- Hall Peter y Qiwei Yao (2003). Inference in ARCH and GARCH Models with Heavy-Tailed Errors, *Econometrica*, Vol. 71, núm. 1, enero 2003, 285-317.
- Hallock, P., (2005) "Global change and modern coral reefs: new opportunities to understand shallow-water carbonate depositional processes". *Sediment. Geol.*, 175, 19-33.
- Hamilton, J. M. and Lau, M. (2005), *The Role of Climate Information in Tourist Destination Choice decisionmaking*.
- Hanley, N. y Spash, C.L. (1993): *Cost-Benefit Analysis and the Environment*. Aldershot: Edward Elgar.
- Hannah, L., G.F. Midgley y D. Millar, (2002b): "Climate change-integrated conservation strategies". *Global Ecol. Biogeogr.*, 11, 485-495.
- Hannah, L., G.F. Midgley, T. Lovejoy, W.J. Bond, M. Bush, J.C. Lovett, D. Scott y F.I. Woodward, (2002a) "Conservation of biodiversity in a changing climate". *Conserv. Biol.*, 16, 264-268
- Hansen, J., L. Nazarenko, R. Ruedy, M. Sato, J. Willis, A. Del Genio, D. Koch, A. Lacis, K. Lo, S. Menon, T. Novakov, J. Perlwitz, G. Russell, G.A. Schmidt, y N. Tausnev. (2005). "Earth's energy imbalance: Confirmation and implications". *Science* 308:1431-1435.
- Hansen, J., Sato, M.; Ruedy, R.; Nazarenko, L.; Lacis, A.; Schmidt, G. A.; Russell, G.; Aleinov, I.; Bauer, M.; Bauer, S.; Bell, N.; Cairns, B.; Canuto, V.; Chandler, M.; Cheng, Y.; Del Genio, A.; Faluvegi, G.; Fleming, E.; Friend, A.; Hall, T.; Jackman, C.; Kelley, M.; Kiang, N.; Koch, D.; Lean, J.; Lerner, J.; Lo, K.; Menon, S.; Miller, R.; Minnis, P.; Novakov, T.; Oinas, V.; Perlwitz, Ja.; Perlwitz, Ju.; Rind, D.; Romanou, A.; Shindell, D.; Stone, P.; Sun, S.; Tausnev, N.; Thresher, D.; Wielicki, B.; Wong, T.; Yao, M.; Zhang, S. et al., (2005): "Efficacy of climate forcings". *J. Geophys. Res.*, 110, D 18104, doi:10.1029/2005JD005776.
- Harvey, Leybourne y Newbold, (2003), "How great are the great ratios?", *Applied Economics*, Volume 35, Issue, pp. 163 – 177.
- Hausman, J. A. (1978), "Specification test in econometrics", *Econometrica*, 46: 1251-1272.
- Havstad, KM, DPC Peters, R Skaggs, et al. (2007). "Ecological services to and from rangelands of the United States". *Ecological Economics*, 64, 261–268..
- Hayden M. (2008). "Weather, Climate and Health". Tulane University School of Public Health New Orleans, LA.
- Heal, G., (2000). "Nature y the Marketplace". *Capturing the Value of Ecosystem Services*. Island Press, Washington, D.C.
- Heikinheimo M. y H. Lappalainen (1997) "Dependence of the flower bud burst of some plant taxa in Finland on effective temperature sum: Implications for climate warming". *Annales Botanic Fennici* 34:229- 243
- Heilig, G. K. (1994). "The greenhouse gas methane (CH<sub>4</sub>): Sources and sinks, the impact of population growth, possible interventions," *Population and Environment* 16(2): 109–137.
- Hellier G. 2000. Edinburg Center for Carbon Management (ECCM). Comunicación Personal. (<http://www.eccm.uk.com>).
- Henderson, J.W. (2002) "Health Economics and Policy", 3rd edition, Thomson South-Western.
- Henderson, W. and Wilkins, C.W. 1975. The interaction of bushfires and vegetation. *Search*, 6(4):130-133.
- Hernández M. E. y G. Valdez (2004), "Sequía meteorológica", en Martínez J. y A. Fernández (comp) *Cambio climático: una visión desde México*, INE-SEMARNAT, pp. 315-325

- Hernández, L., Téllez, M., Sanín, L., Lacasaña, M., Campos, A., Romieu, I. (2000) "Relación entre consultas a urgencias por enfermedad respiratoria y contaminación atmosférica en Ciudad Juárez, Chihuahua". *Salud Pública de México*, 42: 288-297.
- Hewitt G M, (1996) "Some genetic consequences of ice ages, y their role in divergence y speciation", *Biological Journal of the Linnean Society*, 58, 247-276
- Hewitt G. M. (1993) "Postglacial distribution y species substructure: Lessons from pollen insects y hybrid zones". In D. R. Lees y D. Edwards eds. *Evolutionary patterns y processes*. Linnean Society Symposium Series 14: 97-123. London: Academic Press.
- Hexem, R. W. and Heady, E. O. (1978). *Water production functions for irrigated agriculture*. Iowa State Univ. Press, Ames, Iowa.
- Hill, J. K. , Thomas, C. D. , Fox, R., Telfer, M. G., Willis, S. G., Asher, J. & Huntley, B., 2002. Responses of butterflies to twentieth century climate warming: implications for future ranges. *Proceedings of the Royal Society of London Series B-Biological Sciences*, 269: 2163-2171"
- Hill, J.K., Y.C. Collingham, C.D. Thomas, D.S. Blakeley, R. Fox, D. Moss y B. Hoegh-Guldberg, O., (2003) "Coral reefs in a century of rapid environmental change". *Symbiosis*, 37, 1-31.
- Hinga, K. R. (2002) "Effects of pH on on Coastal marine phytoplankton. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 238: 281-300
- Hitz, S. y Smith, (2004) "Estimating global impacts from Climate Change", en Morlot J. y Agrawala (Comps), *The benefits of climate change policies*, OECD, Paris.
- Hitz, S., Smith, J. (2004). "Estimating global impacts from climate change," *Global Environmental Change* 14 (3): 201-218.
- Hodgson, G. y J. A. Dixon. (1988). "Logging Versus Fisheries y Tourism in Palawan". Occasional Paper No.7. Honolulu: East West Environment y Policy Institute
- Hodrick, R. y E.C. Prescott (1997), "Postwar U.S. business cycles: An empirical investigation", *Journal of Money, Credit, and Banking*, 29, 1-16
- Hoegh-Guldberg, O., (1999): "Climate change, coral bleaching y the future of the world's coral reefs". *Mar. Freshwater Res.*, 50, 839-866.
- Hoegh-Guldberg, O., (2005) "Low coral cover in a high-CO2 world". *J. Geophys. Res. C*, 110, C09S06, doi:10.1029/2004JC002528.
- Hoegh-Guldberg, O., H. Hoegh-Guldberg, D.K. Stout, H. Cesar y A. Timmerman, (2000) "Pacific in Peril: Biological, Economic y Social Impacts of Climate Change on Pacific Coral Reefs". Greenpeace, Sidney, 72 pp.
- Hoek, W., Konradsen, F., Amerasinghe, P., Perera, D., Piyaratne, M. Amerasinghe, F. (2003) "Towards a risk map of malaria for Sri Lanka: the importance of house location relative to vector breeding sites". *International Journal of Epidemiology*, ;32 280-285.
- Hogan, W.W. y D.W Jorgenson (1991), "Productivity trends and the cost of reducing carbon dioxide emissions", *Energy Journal*, 12(1) (Enero), 67-85.
- Holstein, J., Canoui-Poitaine, F., Neumann, A., Lepage, E., Spira, A. (2005) "Were less disabled patients the most affected by 2003 heat wave in nursing homes in Paris, France?". *Journal of Public Health*,; 27: 359-365
- Hondroyanis, G., S. Lolos, y E. Papapetrou (2002). "Energy consumption and economic growth: Assessing the evidence from Greece", *Energy Economics*, 24, 319-336.
- Houghton J. T., Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguera, P. J. van der Lien, y D. Xiaosu. (2001) "Climate Change 2001: The scientific basis". In IPCC Third Assessment Report: Climate Change 2001, p. 944. Cambridge: Cambridge University Press.

- Houghton RA (1999) The annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use 1850–1990. *Tellus* 51B, 298–313.
- Houghton, R.A. y J.L. Hackler (2001), Carbon Flux to the Atmosphere from Land-use Changes: 1850–1990, ORNL/CDIAC-79, NDP-050/R1, Oak Ridge, TN, Carbon Dioxide Information Analysis, Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy.
- Howard, P. (1995). "The Economics of Protected Areas in Uganda: Costs, Benefits, y Policy Issues". Disertación no publicada, University of Edinburgh. Resumida en: A. Bagri, J. Blockhus, F. Grey, y F. Vorhies (eds.). 1998. *Economic Values of Protected Areas: A Guide for Protected Area Managers*. Gland: IUCN.
- Hsiao, C. (2003). *Analysis of Panel Data*. 2nd edition. Cambridge University Press, Cambridge  
<http://www.ine.gob.mx/dgicurg/cclimatico/index.html>
- Huerta, C. (1997). "La herbolaria." *Biodiversitas*, Año 3 No. 12.
- Hughes I. (2000) "Biological consequences of global warming: Is the signal already apparent?" *Trends in ecology y Evolution* 15: 56-61
- Huntley B. "North Temperate Responses" (2005) in: T.E. Lovejoy y L. Hannah (eds.), *Climate Change and Biodiversity*. Yale University Press, New Haven CT
- Huntley, B., y H. J. B. Birks (1983) "An Atlas of Past y Present Pollen Maps for Europe 0-13,000 yers ago". Cambridge: Cambridge University Press.
- Hustache; S., Nacher, M., Djossou, F., Carme, B. (2007) "Malaria risk factors in amerindian children in French Guiana". *American Journal Tropical Medicine and Hygiene*; 76: 619-625.
- Ibarrarán, M.E., Antoinette L. Brenkert, and Elizabeth L. Malone (2007), "Climate change vulnerability and resilience: an exploratory analysis for Mexico", Joint Climate Change Research Institute, College Park, MD.
- IMTA (2007), Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México, GACETA DEL IMTA: 7
- INE (2000) Instituto Nacional de Ecología.
- INE (2007), <http://www.ine.gob.mx/dgicurg/cclimatico/index.html>. Instituto Nacional de Ecología
- INE (2008), <http://www.ine.gob.mx/dgicurg/cclimatico/index.html>
- INEGI (1996), Sistema de cuentas económicas y ecológicas de México. 1985-1992. México
- INEGI (2000), Sistema de cuentas económicas y ecológicas de México. 1993-1999. México
- INEGI (2004), Sistema de cuentas económicas y ecológicas de México. 1997-2000. México
- INEGI (2006), "Sistema de Cuentas Económicas y Ecológicas de México" (SCEEM 1984-2004). Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática
- INEGI (2008), [www.inegi.gob.mx](http://www.inegi.gob.mx). Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática
- INEGI, (1994), Estadísticas del Medio Ambiente. México.
- Inkley, D.B., M.G. Anderson, A.R. Blaustein, V.R. Burkett, B. Felzer, B. Griffith, J. Price and T.L. Root, (2004) *Global Climate Change and Wildlife in North America*. The Wildlife Society, Bethesda, Maryland, 34 pp.
- Inouye, D.W., M. A. Morales y G.J. Dodge, (2002) "Variation in timing and abundance of flowering by *Delphinium barbeyi* Huth (Ranunculaceae): the roles of snowpack, frost and La Niña, in the context of climate change". *Oecologia*, 130, 543-550.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), (1996): "Greenhouse gas inventory reference manual" IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories, Reference manual Vol. 3, J.T. Houghton, L.G. Meira Filho, B. Lim, K. Treanton, I. Mamaty, Y. Bonduki, D.J. Griggs and B.A. Callender [Eds.]. IPCC/ OECD/IEA. UK Meteorological Office, Bracknell, pp. 6.15-6.23.



- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), (2001) "Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability". J.J. McCarthy, O.F. Canziani, and N.A. Leary, et al. (Eds.). Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York, New York
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), (2001) "The Climate Change 2001: The Scientific Basis" Third Assessment Report: Climate Change 2001. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) J. T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden and D. Xiaosu (Eds.) Cambridge University Press, UK.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), (2001) "Third Assessment Report: Climate Change 2001" Watson, R.T. and the Core Writing Team (Eds.) Geneva, Switzerland. pp 184 Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), (2001): Climate Change (2001) "Mitigation". Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), (2007) "Climate Change 2007: The Physical Science Basis". Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.) Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), (2007) "Fourth Assessment Report: Climate Change 2007" Abdelkader Allali, Roxana Bojariu, Sandra Diaz, Ismail Elgizouli, Dave Griggs, David Hawkins, Olav Hohmeyer, Bubu Pateh Jallow, Lucka Kajfez-Bogataj, Neil Leary, Hoesung Lee, David Wratt. (eds) Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), (2007), Summary for Policymakers on Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Metz, B., O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave y L.A. Meyer (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), (2007). Climate Change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. M. Parry, O. Canziani, J. Palutikof, P. Van der Linden, C. Hanson. Ed. Cambridge University Press.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), (2007a) "Climate Change 2007. Synthesis report" Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), (2008), Climate change and Water, IPCC Technical Paper IV. Intergovernmental Panel for Climate Change. UNEP-WMO
- Irland, L.C., D.Adams, R.Alig, C.J. Betz, C.C. Chen, M. Hutchins, B.A. McCarl, K. Skog and B.L. Sohngen, (2001), Assessing socioeconomic impacts of climate change on US forests, wood-product markets, and forest recreation. *BioScience*, 51, 753-764.
- Irwin. E.G., and J. Geoghegan. 2001. Theory, data, methods: developing spatially explicit economic models of land use change. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 85:7-23.
- Izazola, H. 2001. Agua y sustentabilidad en la Ciudad de México. *Estudios Demográficos y Urbanos* 47, Vol. 16,
- Jackson, J. B. C. (1995) "Constancy y Change of life in the sea". En: *Extinction Rates*, ed. Lawton, J. H, y May, R. M., pp. 45-54. Oxford: Oxford University Press
- Jaffe AB, R.G. Newell and R.N. Stavins, (2003): "Technological change and the environment" *Handbook of Environmental Economics*, Maler KG and Vincent JR Ed., 1: 461-516
- Jenerette G. Darrel, Larissa Larsen. (2006), "A global perspective on changing sustainable urban water supplies", *Global and Planetary Change*, 50, pp. 202-211

- Jo, H.K. y McPherson, E.G. (1995), "Carbon storage y flux in urban residential greenspace". *Journal of Environmental Management* 45(2) (1995):109-133.
- Johansen, S. (1988). "Statistical analysis of cointegration vectors", *Journal of Economic Dynamics and Control*, 12, 231-254.
- Johansen, S. (1992), "Determination of the cointegration rank in the presence of a linear trend", *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, 54, 383-397.
- Johansen, S. (1995), *Likelihood Based Inference on Cointegration in the Vector Autoregressive Model*, Oxford University Press, Oxford.
- Johnes, P.J. 1996. Evaluation and management of the impact of land use change on the nitrogen and phosphorus load delivered to surface waters: the export coefficient modeling approach. *Journal of Hydrology*, 183(3-4), pp. 323-349
- Johnson E.A., (1992) *Fire and vegetation dynamics, studies from the north American Boreal Forest*. Cambridge University Press
- Johnson, Alatorre, Romo y Liu (2009), "MEDEC: México Low – Carbon History" Banco Mundial.
- Johnson, P., J. Ashworth (1990), "Modeling tourism demand: A summary review", *Leisure Studies*, 9(2), 145-161(17).
- Jompa, J. y L.J.McCook, (2003) "Coral-algal competition: macroalgae with different properties have different effects on corals". *Mar. Ecol.–Prog. Ser.*, 258, 87- 95.
- Jones, L.E. y R.E. Manuelli (1994), "A convex model of equilibrium growth: theory and policy implications", *Journal of Political Economy*, vol. 98, núm. 5, 1008-1038.
- Jones, P.D., (1994) Hemispheric surface air temperature variations: A reanalysis and an update to 1993. *Journal of Climate*, 3, 1794-1802.
- Jørgensen et al. (2005), Park et al., 2006 Y.S. Park, L. Sovan, M. Scardi, P.F.M. Versonshot and S.E. Jørgensen, Patterning exergy of benthic macroinvertebrate communities using self-organising maps, *Ecol. Model.* 190 (2006)
- Jorgenson, D. W. y P.J. Wilcoxon (1993), "Energy, the environment, and economic growth", en Kneese, A., Sweeney, J. (Eds.), *Handbook of natural resource and energy economics*, vol. III, 1267-1349.
- Just, R. E. y R. D. Pope (2003). "Agricultural Risk Analysis: Adequacy of Models, Data and Issues." *American Journal of Agricultural Economics* 85
- Just, R.E. (1974), "An Investigation of the Importance of Risk in Farmers' Decisions", *American Journal of Agricultural Economics*, 56, pp. 14–25.
- Kabubo-Mariara, J. y F. K. Karanja (2007) "The Economic Impact of Climate Change on Kenyan Crop Agriculture: a Ricardian Approach", *Policy Research Working, Paper 4334*, The World Bank.
- Kabuto, M., Y. Honda and H. Todoriki, (2005) "A comparative study of daily maximum and personally exposed temperatures during hot summer days in three Japanese cities (in Japanese)". *Nippon Kosho Eisei Zasshi*, 52, 775-784.
- Kai K., M Kainuma y N. Murakoshi (1996) "Effects of global warming on the phenological observation in Japan". In: *Climate Change y Plants in East Asia*, K. Omasa, H. Kai, H. Taoda y Z. Uchijima, eds., pp. 85-92. Tokio: Springer
- Kaimowitz, David and Arild Angelsen. (2008). Will livestock intensification help save Latin America's forests? Forthcoming in *Journal of Sustainable Forestry*.
- Kaiser R, Rubin CH, Henderson A, et al. Heat-related deaths and mental illness during the 1999 Cincinnati heat wave. *Am J Forensic Med Pathol* 2001;22:303-7.

- Kalkstein LS. 1991. A New approach to evaluate the impact of climate on human health. *Environmental Health Perspectives* 96:145-150.
- Kalkstein, L.S., 1993. Health and Climate Change - Direct Impacts in Cities. *The Lancet*,
- Katsumata, T., D. Hosea, E.B. Wasito, S. Kohno, K. Hara, P. Soeparto and I.G. Ranuh, (1998) "Cryptosporidiosis in Indonesia: a hospital-based study and a community-based survey". *Am. J. Trop. Med. Hyg.*, 59, 628-632.
- Kaufmann, R.K., Snell, S.E., (1997). A biophysical model of corn yield: integrating climatic and social determinants. *Am. J. Agric. Econ.* 79, 178-190.
- Kaya, Y, (1989) "Impact of Carbon Dioxide Emission Control on GNP Growth: Interpretation of Proposed Scenarios". Paper presented to the IPCC Energy and Industry Subgroup, Response Strategies Working Group, Paris.
- Kennet J. P. y L. D. Stott (1991) "Abrupt deep-sea warming, paleoceanographic changes and benthic extinctions at the end of Paleocene". *Nature* 353: 225-229
- Kimball, B. A.: (1983), 'Carbon Dioxide and Agricultural Yield. An Assemblage and Analysis of 430 Prior Observations', *Agronomy J.* 75, 779-788.
- King and Levine; (1993), "Financial Intermediation and Economic Development", in "Financial Intermediation in the Construction of Europe, Eds. Colin Mayer and Xavier Vives. London: Centre for Economic Policy Research, pp.156-89.
- Kleypas, J.A. y C. Langdon, (2002) "Overview of CO<sub>2</sub>-induced changes in seawater chemistry". *World Coral Reefs in the New Millennium: Bridging Research y Management for Sustainable Development*, M.K.Moosa, S. Soemodihardjo, A. Soegiarto, K. Romimohtarto, A. Nontji y S. Suharsono, Eds., Proceedings of the 9th International Coral Reef Symposium, 2, Bali, Indonesia. Ministry of Environment, Indonesian Institute of Sciences, International Society for Reef Studies, 1085-1089.
- Kleypas, J.A., R.W. Buddemeier y J.P. Gattuso, (2001) "The future of coral reefs in an age of global change". *Int. J. Earth Sci.*, 90, 426-437.
- Kleypas, J.A., R.W. Buddemeier, D. Archer, J.P. Gattuso, C. Langdon y B.N. Opdyke, (1999) "Geochemical consequences of increased atmospheric carbon dioxide on coral reefs". *Science*, 284, 118-120.
- Knutson T. y Tuleya R., (2004), "Impact of CO<sub>2</sub>-Induced Warming on Simulated Hurricane Intensity and Precipitation: Sensitivity to the Choice of Climate Model and Convective Parameterization", *Journal of Climate*, 17(18), 3477-3495
- Konvicka, M., M. Maradova, J. Benes, Z. Fric y P. Kepka, (2003) "Uphill shifts in distribution of butterflies in the Czech Republic: effects of changing climate detected on a regional scale". *Global Ecol. Biogeogr.*, 12, 403-410.
- Koop, K., D. Booth, A. Broadbent, J. Brodie, D. Bucher, D. Capone, J. Coll, W. Dennison, M. Erdmann, P. Harrison, O. Hoegh-Guldberg, P. Hutchings, G.B. Jones, A.W.D. Larkum, J. O'Neil, A. Steven, E. Tentori, S. Ward, J. Williamson y D. Yellowlees, (2001) "Encore: The effect of nutrient enrichment on coral reefs: synthesis of results y conclusions". *Mar. Pollut. Bull.*, 42, 91-120.
- Koppe, C., G. Jendritzky, R.S. Kovats and B. Menne, (2004) "Heat-waves: Impacts and Responses". *Health and Global Environmental Change Series: 2. World Health Organization, Copenhagen*, 123 pp.
- Korner, C., R. Asshoff, O. Bignucolo, S. Hattenschwiler, S.G. Keel, S. Pelaez-Riedl, S. Pepin, R.T.W. Siegwolf and G. Zotz., (2005): Carbon flux and growth in mature deciduous forest trees exposed to elevated CO<sub>2</sub>. *Science*, 309, 1360-1362.
- Kozak, M. (2002), *Comparative Analysis of Tourist Motivations by Nationality and Destinations*.
- Kraft, J. y A. Kraft (1978), "On the relationship between energy and GNP", *Journal of Energy and Development*, 3, 401-403.
- Krutilla, John. (1967). "Conservation Reconsidered" . *The American Economic Review*, vol. 57: pp. 777-786.



- Kullman, L. (2001). "20th century climate warming y tree-limit rise in the southern Scandes in Sweden". *Ambio* 30:72-80.
- Kumari, K. (1995). "Mainstreaming Biodiversity Conservation: a Peninsular Malaysian Case". *International Journal of Sustainable Development y World Ecology* 2: 182-198.
- Kurosaki, T. (2006), Consumption, vulnerability to risk in rural Pakistan, *Journal of Development Studies*, vol. 42, No. 1, enero, 70-89.
- Kurukulasuriya, P. y M. Ajwad (2004), "Estimating the impact of climate change on smallholders: A case study on the agricultural sector in Sri Lanka", en Mendelsohn, R. et al. (eds), *Cross-Sectional Analyses of Climate Change Impacts*, World Bank Policy Research Working Paper, 3350, World Bank, Washington DC.
- Kurukulasuriya, P. y S. Rosenthal (2003), "Climate change and agriculture: A review of impacts and adaptations", en *Climate Change Series, Agriculture and Rural Development Department and Environment Department*, 91, The World Bank, Washington, DC.
- Kwiatkowski, D., P.C.B. Phillips, P. Schmidt e Y. Shin (1992), "Testing the null hypothesis of stationary against the alternative of a unit root", *Journal of Econometrics*, 1, 159-178.
- Lacasaña, M., Esplugues, A., Ballester, F. (2005) "Exposure to ambient air pollution and prenatal and early childhood health effects". *European Journal of Epidemiology*,; 20: 183-199
- LaGro, J.A., y, S.D. DeGloria. (1992). Land use dynamics within an urbanizing non-metropolitan county in New York state (USA). *Landscape Ecol.* 7, 275-289.
- Lambin, E. (1994). *Modelling Deforestation Process, A Review*. European Commission, Institute for Remote Sensing Applications, European Space Agency.
- Lambin, E. F., B.L.Turner, H.J. Geist, S.B. Agbola, A. Angelsen, J.W. Bruce, O. T. Coomes, R. Dirzo, G. Fischer, C. Folke, P.S. George, K. Homewood, J. Imbernon, R. Leemans, X. Li, E.F. Moran, M. Mortimore, P.S. Ramakrishnan, J.F. Richards, H. Skanes, W. Steffen, G.D. Stone, U. Svedin, T.A. Veldkamp, C. Vogel and, J. Xu (2001). The causes of land-use and landcover change: moving beyond the myths. *Global Environmental Change*, 11: 261-269.
- Lamourecu, X, y, Lastrapews., (1990): "Heteroskedasticity in stock return data: volume versus GARCH effects", *Journal of Finance*,
- Landa R., V. Magaña y C. Neri (2008), "Agua y clima: elementos para la adaptación al cambio climático", SEMARNAT-UNAM, México
- Langdon, C. R. Takahashi, C. Sweeney, D. Chipman, y M. J. Atkinson (2000) "Effect of calcium carbonate saturation state on the calcification rate of experimental coral reef". *Global biogeochemical Cycles* 14: 639-654
- Langdon, C., W.S. Broecker, D.E. Hammond, E. Glenn, K. Fitzsimmons, S.G. Nelson, T.H. Peng, I. Hajdas y G. Bonani, (2003) "Effect of elevated CO2 on the community metabolism of an experimental coral reef". *Global Biogeochem. Cy.*, 17, 1011, doi:10.1029/2002GB001941.
- Lara-Domínguez A. L. A. (1998)Yáñez-Arancibia, Y J.C. Seijo "Valuación económica de los servicios de los ecosistemas. Estudio de caso de los manglares en Campeche" En: aspectos económicos sobre la biodiversidad de México; Hesiquio Benítez Díaz, Eduardo Vega López, Arturo Peña Jiménez y Sophie Ávila Foucat (Eds); INE, SEMARNAT, CONABIO
- Laurance, W.F. and G. Bruce Williamson. (2001) Positive Feedbacks among Forest Fragmentation, Drought, and Climate Change in the Amazon. *Conservation Biology* 15:6, 1529-1535
- Lehikoinen E, Sparks TH, Zalakevicius M (2004) Arrival y departure dates. *Adv Ecol Res* 35: 1-21.
- Lemley, (2000), "Why Is There Life?" *Discover*, Vol.21 Number 11.
- Leuliette, E.W., R. S. Nerem, y G.T. Mitchum (2003). "Calibration of TOPEX/Poseidon and Jason altimeter data to construct a continuous record of mean sea level change". *Marine Geodesy* 27:79-94.

- Levy, J.I., S.M. Chemerynski and J.A. Sarnat, (2005): "Ozone exposure and mortality: an empiric bayes metaregression analysis". *Epidemiology*, 16, 458-468.
- Limburg Karin E., Robert V. O'Neill b, Robert Costanza, Stephen Farber (2002) "Complex systems y valuation" SPECIAL ISSUE: The Dynamics y Value of Ecosystem Services: Integrating Economic y Ecological Perspectives. *Ecological Economics* 41: 409-420
- Lindgren, E., L. Talleklint y T. Polfeldt, (2000) "Impact of climatic change on the northern latitude limit y population density of the disease-transmitting European" tick *Ixodes ricinus*. *Environ. Health Persp.*, 108, 119-123.
- Lipman Geoffrey, (2007), "UNWTO Overview: Tourism and Climate Change "
- Lister, A., y P. Bahn (1995) "Mammoths". London: Box-tree.
- Lluch- Cota D. (2004) "El sector pesquero" en: Martínez J. y Fernández A. Coord. (2004) "Cambio climático una visión desde México" SEMARNAT, INE.
- Loa L. E., M. Cervantes A., L. Durand S. y A. Peña J. (1996). "Uso de la Biodiversidad". En. La biodiversidad biológica de México. Estudio de país"; CONABIO. México. pp104-153.
- Lobell, D.B. and P. Asner, (2003): Climate and management contributions to recent trends in U.S. agricultural yields. *Science*, 299, 1032.
- Loeschcke, V., J. Bundgaard and J.S.F. Barker. (2000). Reaction norms across and genetic parameters at different temperatures for thorax and wing size traits in *Drosophila aldrichi* and *D. buzzatii*. *J. Evol. Biol.*
- Logan, J.A., J. Regniere y J.A. Powell, (2003): "Assessing the impacts of global warming on forest pest dynamics". *Front. Ecol. Environ.*, 1, 130-137.
- Long S. P. y B. G. Drake (1991) "The effect of the long-term CO<sub>2</sub> fertilization in the field on the quantum yield of photosynthesis in C<sub>3</sub> sedge". *Scirpus olneyi*. *Plant Physiology* 96: 221-226
- Long S. P. y B. G. Drake (1992) "Photosynthetic CO<sub>2</sub> assimilation y rising atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations". pp 63-103. In N. R. Baker y H. Thomas, eds., *Crop Photosynthesis: Spatial y Temporal Determinants*. Amsterdam: Elsevier Science
- Long, S.P., E.A. Ainsworth, A. Rogers and D.R. Ort, (2004): Rising atmospheric carbon dioxide: plants FACE the future. *Annu. Rev. Plant Biol.*, 55, 591-628.
- Loomis, D., Castillejos, M., Gold, D., McDonnell, W., Borja-Aburto, V. (1999) "Air Pollution and Infant Mortality in Mexico City". *Epidemiology*; 10: 118-123
- López-Feldman, A. and J. E. Taylor, (2005). Resource Extraction and Poverty: The Case of Xate in Frontera Corozal, Mexico. Paper Presented at the Annual Meeting of the Latin American and Caribbean Economics Association (LACEA). Paris, France. October 2005
- López-Moreno J.I., Beniston M., García-Ruiz J.M. (2008), "Environmental change and water management in the Pyrenees: Facts and future perspectives for Mediterranean mountains", *Global and Planetary Change*, 61, pp. 300-312
- Louis, V.R., I.A. Gillespie, S.J. O'Brien, E. Russek-Cohen, A.D. Pearson and R.R. Colwell, (2005) "Temperature-driven *Campylobacter* seasonality in England and Wales". *Appl. Environ. Microbiol.*, 71, 85-92.
- Lovejoy, T.E. y L. Hannah, Eds., (2005) "Climate Change y Biodiversity". Yale University Press, New Haven, Connecticut, 418 pp.
- Lozano García Ma. Socorro (2004) "Evidencia del Cambio Climático: Cambios en el paisaje" INE, SEMARNAT
- Luckman B., (1994) "Using multiple high-resolution proxy climate records to reconstruct natural climate variability: an example from the Canadian Rockies. *Mountain Environments in Changing Climates*". M. Beniston, Ed., Routledge, London, 42-59

- Ludeke, A.K., Maggio, R.C., Reid, L.M., 1990. An analysis of anthropogenic deforestation using logistic regression and GIS. *J. Environ. Manage.* 32, 247–259.
- Ludwichowski I. (1997) “Long term changes of wing-length, body mass y breeding parameters in first time breeding females of goldeneyes. (*bucephala clangula clangula*)” in northern germany volgewarte 39: 103-116
- Ludwig Donald (2000) “Limitations of Economic Valuation of Ecosystems” *Ecosystems* 3: 31–35
- Lyon 1981 K. S. (1981) “Mining of the forests y the time parth of the price of timber”. *Journal of environmental Economics y management* 8: 330-344.
- Mabey, Nick, Stephen Hall, Clare Smith, y Sujata Gupta. (1997). “Argument in the greenhouse: the international economics of controlling global warming”. *Global Environmental Change Series*.
- Mackas D. L., R. Goldblatt, y G. Lewis (1998) “Interdecadal variation in developmental timing of *Necalanus plumchrus* populations at ocean Station P in the subarctic North Pacific”. *Canadian Journal of Fisheries y Aquatic Science* 55: 1878-1893.
- Maddala, G.S. e I. Kim (1998), *Unit roots, Cointegration and Structural Change*, Cambridge University Press.
- Madden, R. A., and J. Williams (1978), “The correlation between temperature and precipitation in the United States and Europe, *Mon. Weather Rev*”
- Maddison, D. (2000), “A hedonic analysis of agricultural land prices in England and Wales”, *European Review of Agricultural Economics*, 27, pp. 519–532.
- Maddison, D., M. Manley y P. Kurukulasuriya (2007), “The impact of climate change on African agriculture: A Ricardian approach”, *Policy Research Working Paper, 4306*, The World Bank, August.
- Magaña V. (1998) “Los impactos del “niño” en México”, *Centro de Ciencias de la Atmósfera UNAM, Dirección General de Protección Civil, Secretaría de Gobernación, México*
- Magaña Víctor, Juan Matías Méndez, Ruben Moralez, y Cecilia Millán. (2004) “Consecuencias presentes y futuras de la variabilidad y el cambio climático en México”. *INE, SEMARNAT*
- Magaña, V., (2005): *Escenarios climatológicos para la región de México, Centroamérica y Cuba. Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM/PNUD. 3 pp.*
- Magaña, V., J.A.Amador y S. Medina, (1999): *The mid-summer drought over Mexico and Central America. Journal of Climate*, 12, 1577-1588.
- Malcolm, J. R., A. Markham, R. P. Neilson y M. Garaci (2002) “Estimated migration rates under scenarios of global climate change. *Journal of Biogeography* 29: 835-849
- Malcolm, J.R., C.R. Liu, R.P. Neilson, L. Hansen y L. Hannah, (2006): “Global warming y extinctions of endemic species from biodiversity hotspots”. *Conserv. Biol.*, 20, 538-548.
- Mankiw, N. Gregory, David Romer y David N. Weil (1992), “A Contribution to the Empirics of Economic Growth”, *Quarterly Journal of Economics*, vol. 107, mayo, pp. 407-437.
- Markgraf V M McGlone, y G. Hope (1995) “Neogene paleoclimatic change in southern temperate ecosystems a southern Perspective”. *Trends in Ecology y Evolution* 10: 143-147.
- Markgraf, V. E. Romero, y C. Villagrán. (1996) “History y paleoecology of South American *Nothofagus* forests”. *En: The ecology y Biogeography of Northofagus forests*, pp. 354-386, ed. T.T. Veblen, R.S. Hill, y J. Read. New Haven y London: Yale University Press.
- Marsden M.A. (1983). *Modeling the effect of wildfire frequency on forest structure and succession in the northern Rocky Mountains. Journal of Environmental Management* 16: 45-62.
- Martens, W., Niessen, L., Rotmans, J., Jetten, T., McMichael, A. (1995) “Potential Impact of Global Climate Change on Malaria Risk”. *Environmental Health Perspectives*,; 103: 458-464.
- Martínez-Austria P. (2007) “Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México”, *IMTA-SEMARNAT*

- Martín-López, B., Montes, C. y Benayas, J. (2008) "Economic valuation of biodiversity conservation: the meaning of numbers". *Conservation Biology*.139:67-82
- Marubini, F., C. Ferrier-Pages y J.P. Cuif, (2003): "Suppression of skeletal growth in scleractinian corals by decreasing ambient carbonate-ion concentration: a cross-family comparison". *P. Roy. Soc. Lond. B*, 270, 179-184.
- Marubini, F., H. Barnett, C. Langdon y M.J. Atkinson, (2001): "Dependence of calcification on light y carbonate ion concentration for the hermatypic coral" *Porites compressa*. *Mar. Ecol.-Prog. Ser.*, 220, 153-162.
- Mas, J. F., H. Puig, J. L. Palacio y A. Sosa (2003), "Un modelo espacial de riesgo de deforestación", *Anais XI*
- Masera, O. (1995). "México y el cambio climático global: El papel de la eficiencia energética y alternativas de manejo forestal en la reducción de emisiones de bióxido de carbono" In. Juan J. Jardón. Plaza y Valdés Eds. *Energía y Medio Ambiente: Una perspectiva económico-social*.Pp 157-177.
- Masera, O.; M. R. Bellon y G. Segura; (1995) "Forest Management Options for Sequestering Carbon in Mexico"; en *Biomass y Bioenergy*, Vol. 8, No. 5
- Matsumoto, K., T. Ohta, M. Irasawa y T. Nakamura, (2003) "Climate change y extension of the Ginkgo biloba L. growing season in Japan". *Global Change Biol.*, 9, 1634-1642.
- Matthys, M., Vounatsou, P., Raso, G., Tschannen, A., Gbede, E., Gosoniu, L., Cissé, G., Tanner, M., N'goran, E., Utzinger, J. (2006) "Urban farming and malaria risk factors in a medium-sized town in côte d'ivoire". *American Journal Tropical Medicine and Hygiene*; 75: 1223-1331.
- Mazari-Hiriart, Marisa y Mauricio Bellón (1995)"Sustentabilidad del desarrollo urbano: Agua" en Adrian Aguilar Castro y Eduardo Juárez (cords), *El desarrollo urbano a fines del siglo XX*, Monterrey, Instituto de Estudios Urbanos de Nuevo León /sociedad Mexicana de Demografía.
- Mazari-Hiriart, M, Hernández-Eugenio, C., Rojo-Callejas, F., Lozano-Santacruz, R., (2000). Vertical variability of PCE sorption in the lacustrine clays of Mexico City. *Environmental Geology* 39(6), 595-602."
- McClanahan, T.R., N.A. Muthiga y S. Mangi, (2001) "Coral y algal changes after the 1998 coral bleaching: interaction with reefmanagement y herbivores on Kenyan reefs". *Coral Reefs*, 19, 380-391.
- McGuffie, K. and Henderson-Sellers, A., (2005): *A Climate Modeling Primer*, Third Edition, John Wiley & Sons, New York, 280 pp.
- McMichael, A.J., A Haines., R. Slooff. y S. Kovats. (1996). "Climate Change and Human Health". World Health Organization, Geneva.
- McNeely, Jeffrey A., and Frederik Schutyser, eds. (2003). *Protected Areas in 2023: Scenarios for an Uncertain Future*. Gland, Switzerland: IUCN
- McNeil, B.I., R.J. Matear y D.J. Barnes, (2004): "Coral reef calcification y climate change: the effect of ocean warming". *Geophys. Res. Lett.*, 31, L22309, doi:10.1029/2004GL021541.
- McWilliams, J.P., I.M. C J.A. Gill,W.J. Sutherland andA.R.Watkinson, (2005) "Accelerating impacts of temperature-induced coral bleaching in the Caribbean". *Ecology*, 86, 2055-2060.
- Meehl, G. A., T. F. Stocker, W. D. Collins, P. Friedlingstein, A. T. Gaye, J. M. Gregory, A. Kitoh, R. knutti, J. M. Murphy, A. Noda, S.C.B. Raper, L. G. Watterson, A. J. Weaver & Z.-C- Zhao, 2007: *Global Climate Projections*. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Worling Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller (eds.)). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Meinshausen, M., (2006): "What does a 2 °C Target mean for greenhouse gas concentrations? A brief analysis based on multi-gas emission pathways and several climate sensitivity uncertainty estimates". In *Avoiding Dangerous Climate Change*. H.J. Schellnhuber, W. Cramer, N. Nakicenovic, T. Wigley, and G. Yohe (eds.), Cambridge University Press, Cambridge.

- Mendelsohn Robert, Nordhaus William and Daigee Shaw (1994); "The impact of Global Warming on Agriculture: A Ricardian Analysis" *The American Economic Review*, Vol. 84, No. 4, pp. 753-771.
- Mendelsohn R, Basist A, Kurukulasuriya P & Dinar A, (2003). *Climate and rural income*.
- Mendelsohn R. (editor) (2002), *Global Warming and the American economy: a regional assessment of climate change impacts*, MPG Books Ltd, Bodmin, Cornwall.
- Mendelsohn R. y J.E. Neumann (1999), *The Impact of Climate Change on the United State Economy*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Mendelsohn, R. y A. Dinar (2003), *Climate, Water, and Agriculture*, *Land Economics*, 79(3), pp. 328-341.
- Mendoza-Salgado R.A., Lechuga-Deveze C.H., A. Ortega-Rubio. (2006), "Influence of rainfall on a subtropical arid zone coastal system", *Journal of Arid Environments*, 66, pp. 247-256
- Menzel, A. (2000). "Trends in phenological phases in Europe between 1951 y 1996". *Intl J. Biometerol.* 44, 76-81
- Menzel, A. y Fabian, P. (1999). "Growing season extended in Europe". *Nature* 397, 659
- Menzel, A. y N. Estrella, (2001) "Plant phenological changes. "Fingerprints" of Climate Change: Adapted Behaviour y Shifting Species Ranges", G.-R. Walther, C.A. Burga y P.J. Edwards, Eds., *KluwerAcademic/Plenum*, New York, 123-137.
- Menzel, A., (2003) "Plant phenological anomalies in Germany y their relation to air temperature y NAO". *Climatic Change*, 57, 243-263.
- Menzel, A., Estrella, N. y Fabian, P. (2001). "Spatial y temporal variability of the phenological seasons in Germany from 1951 to 1996". *Glob. Change Biol.* 7, 657-666
- Menzel, A., G. Jakobi, R. Ahas, H. Scheifinger y N. Estrella, (2003) "Variations of the climatological growing season (1951-2000) in Germany compared with other countries". *Int. J. Climatol.*, 23, 793-812.
- Mertens, B., Lambin, E., 1997. *Spatial modeling of deforestation in southern Cameroon*. *Appl. Geogr.* 17, 143-162.
- Meshinev, T., Apostolova, I., Koleva, E. (2000). "Influence of warming on timberline rising: a case of study on *Pinus peuce Griseb* in Bulgaria". *Phytocoenologia*, 30: 8-431.
- Michelozzi, P., Donato, F., Accetta, G., Forastiere, F. (2003) "Impact of Heat Waves on Mortality". *MMWR. Morbidity and Mortality Weekly Repor*, 2004; 53: 369-371. Rome, Italy
- Millenium Ecosystem Assessment, (2005) "Ecosystem y Human Well-being. Vo. 2: Scenarios": *Findings of the Scenarios Working Group*, Millenium Ecosystem Assessment. Island Press, Washington DC. 560 pp.
- Millennium Ecosystem Assessment, (2005a). "Ecosystems y Human Well-being: Biodiversity Synthesis". *World Resources Institute*, Washington, DC
- Miller R. R., J. D. Williams y J. E. Williams (1989) "Extinctions of North American fishes during the past century". *Fisheries* 14(6): 22-38
- Miller, K.R., Furtado, J., Klemm, C., McNeely, J.A., Myres, N., Soule, M.E., Texton, M.C., (1985). "Maintaining biological diversity, the key factor for a sustainable society", *IUCN*, Gland.
- Miranda, F. y E. Hernández-Xolocotzl. 1963. *Los tipos de vegetación de México y su clasificación*. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 23, C.P..SARH, México.
- Mittermeier, R. y Goettsch, C. (1992). "La importancia de la diversidad biológica de México"; In Sarukhán, J. y Dirzo, R. (comps.), *México Ante los Retos de la Biodiversidad*. CONABIO, México.



- Moinde-Fockler, N.N., Nicholas Otienoh Ouge, Genesio Mugambi Karere, Daniel Otina, Mbaruk Abdalla Suleman. (2007) Human and natural impacts on forests along lower Tana river, Kenya: implications towards conservation and management of endemic primate species and their habitat. *Biodiversity and Conservation* 16:4, 1161.
- Molina, L. y M. Molina (2009), *La Calidad del Aire en la Megaciudad de México. Un Enfoque Integral*, Fondo de Cultura Económica, México.
- Molinero, L.M. (2003). "Meta-análisis. Asociación de la Sociedad Española de Hipertensión". <http://www.seh-lelha.org/pdf/metaanalisis.pdf>
- Molua E.L. (2002), "Climate variability, vulnerability and effectiveness of farm-level adaptation options: The challenges and implications for food security in southwestern Cameroon", *Environment and Development Economics*, 7, pp. 529-545.
- Molua E.L. y C.M. Lambi (2007); "The Economic Impact of Climate Change on Agriculture in Cameroon"; Policy Research Working Paper. The world Bank.
- Montoya, G.; S. Soto, B. de Jong, K. Nelson, P. Farias, P. Yakac'tic, J. H. Taylor, R. Tipper. (1995). "Desarrollo forestal sustentable: Captura de carbono en las zonas tzeltal y tojolabal del estado de Chiapas"; Centro de Investigaciones Ecológicas del Sureste; San Cristóbal de las Casas, Chiapas.
- Moore, M. (1999) "Estimating Irrigators' Ability to Pay for Reclamation Water" *Land Economics* 75(4): 562-578.
- Moore, M. and Dinar, A. (1995) "Water and Land as Quantity-Rationed Inputs in California Agriculture: Empirical Tests and Water Policy Implications" *Land Economics* 71(4): 445-61.
- Moss, B., Stephen, D., Alvarez, C., Bécares E., Van der Bund, W., Van Donck, E., de Eyto, E., Feldmann, T., Fernández-Aláez, C., Fernández-Aláez, M., Franken, R.J.M. García-Criado, F., Gross, E., Gylström, M., Hansson, L.A., Irvine, K., Järvalt, A., Jenssen, J.P., Jeppesen, E., Kairesalo, T., Kornijow, R., Krause, T., Künnap, H., Laas, A., Lill, E., Luup, H., Miracle, M.R., Noges, P. Noges, T., Nykannen, M., Itt, I., Peeters, E.T.H.M., Phillips, G., Romo, S., Salujoe, J., Scheffer, M., Siewertsen, K., Tesch, C., Timm, H., Tuvikene, L., Tonno, I., Vakilainen, K. y Virro, T. (2003). "The determination of ecological quality in shallow lakes-a tested expert system (ECOFAME) for implementation of the European Water Framework Directive". *Aquatic Conservation* 13: 507-549.
- Mudway, I.S. and F.J. Kelly, (2000) "Ozone and the lung: a sensitive issue". *Mol. Aspects Med.*, 21, 1-48.
- Mulholland P.J.; E.R. Marzolf; J.R. Webster; D.R. Hart; S.P. Hendricks. 1997. Evidence that hyporheic zones increase heterotrophic metabolism and phosphorus uptake in forest streams. *Limnology and Oceanography*,
- Muller, M.R. and J. Middleton. 1994. A Markov model of land-use change dynamics in the Niagara Region, Ontario, Canada. *Landscape Ecology* vol. 9 no. 2 pp 151-157
- Muñoz, P.C. 1994. "The economic value of the Mexican Biodiversity" O'Tole R. y K Hess Jr. *Incentives for protecting Northamerican biodiversity*, 1(3). Oregon, E.U.A.
- Muñoz-Piña, C., G. Alarcón, and J.C. Fernández. 2003. *Pixel Patterns of Deforestation in Mexico: 1993-2000*. Instituto Nacional de Ecología, SEMARNAT, MEXICO
- Murray, M. B. y R. Ceulemans (1998) "Will tree foliage be larger y live longer?" In: *European Forests y Global Change: The Likely Impacts of Rising CO2 y temperature*, P. G. Jarvis., ed., pp. 94-125. Cambridge University Press.
- Myers N, Mittermeier, C. G. Mittermeier, G. A. B. Da Fonseca, y J. Kent (2000) "Biodiversity hotspots for conservation priorities" *Nature* 403: 853-858
- Naka, A. y D. Tufté (1997). "Examining impulse response functions in cointegrated systems", *Applied Economics*, 29, 1593-1603.
- National Research Council, (1999): "Perspectives on Biodiversity: Valuing its Role in an Everchanging World". National Academies Press, Washington, District of Columbia, 168 pp.
- Nelson Daniel (1990). Conditional Heteroskedasticity in Asset Returns: A New Approach, *Econometrica*, Vol. 59, núm. 2, marzo 1991, 347-370.

- Nelson, G., Hellerstein, D., 1997. Do roads cause deforestation? Using satellite images in econometric analysis of land use. *Am.J. Agr. Econ.* 79, 80–88.
- Neves R. J., E. Bogan, J. D. Williams, S. A. Ahlstedt, y P. W. Hartfield (1997) "Status of aquatic mollusks in the southeastern United States : a downward spiral of diversity". Pp 43.85 in: G. W. Benz y E. D. Collins eds. *Aquatic Fauna in peril: The southeastern perspective*". Southeastern Aquatic research Institute, Lenz Design y Communications. Decatur Georgia.
- Newman, D.J. y S.A Laird,. (1999). "The influence of natural products on 1997 pharmaceutical sales figures". En K. ten Kate y S.A. Laird, *The commercial use of biodiversity: access to genetic resources y benefit-sharing*, p. 333-335. Earthscan, Londres.
- Noble, I. R. y R. Dirzo 1997. Forest as human dominated ecosystem. *Science* 277:522-525.
- Norby, R.J., E.H. DeLucia, B. Gielen, C. Calfapietra, C.P. Giardina, J.S. King, J. Ledford, H.R. McCarthy and Co-authors, 2005: Forest response to elevated CO<sub>2</sub> is conserved across a broad range of productivity. *P. Natl. Acad. Sci USA*, 102, 18052-18056.
- Norby, R.J., S. D. Wullschlegel , C. A. Gunderson , D. W. Johnson & R. Ceulemans. 1999. Tree responses to rising CO<sub>2</sub> in field experiments: implications for the future forest. *Plant, Cell & Environment*, 22(6):683 – 714
- Nordhaus D. W. y E. Kokkelenberg eds. (1999) "Nature's Numbers, Expanding the National Economic Accounts to Include the Environment". National Academic Press, Washington, D. C.
- Nordhaus W., (2008), *A question of Balance: Weighing the options on Global Warming Policies*, Yale University Press, New Haven & London
- Nordhaus, D.W. (1992). "An optimal transaction path for controlling greenhouse gases"; *Science*, 258:1315-1319.
- Nordhaus, W. (1994), *Managing the Global Commons: the economics of Climate Change*, Cambridge MA., MIT Press
- Nordhaus, W.D. (2006), *Geography and Macroeconomics: New Data and New Findings*, Proceedings of the National Academy of Science.
- Nowak, R.S., D.S. Ellsworth and S.D. Smith, 2004: Tansley review: functional responses of plants to elevated atmospheric CO<sub>2</sub> – Do photosynthetic and productivity data from FACE experiments support early predictions? *New Phytol.*, 162, 253-280.
- Nunes, J.P., Ferreira, J.G., Gazeau, F., Lencart-Silva, J., Zhang, X.L., Zhu, M.Y., Fang, J.G., (2003). A model for sustainable management of shellfish polyculture in coastal bays. *Aquaculture* 219 (1–4), 257–277.
- Nuñez, L., Grosjean, y I Cartajena. (2001) "Human Dimensions of late Pleistocene/Holocene arid events in southern South America". En: *Interhemispheric Climate Linkages*, pp. 105-117, ed. V. Markgraf. San Diego: Academic Press.
- O'Neill B., MacKellar L. y Lutz W. (2001), *Population and Climate Change*, Cambridge University Press
- O'Neill, B., et al., (2003) "Planning for future energy resources". *Science*, 300, pp. 581-582.
- Ochoa-Gaona, S. and M. González-Espinosa. 2000. Land use and deforestation in the highlands of Chiapas, Mexico. *Applied Geography*, 20(1):17-42.
- OECD (2004a): "Statistical Annex of the 2003 Development Cooperation Report", Paris: OECD.
- OECD (2004b): "Natural Disasters and Adaptive Capacity" [J. Dayton-Johnson] Working Paper No 237, DEV/DOC(2004)06, Paris: OECD.
- O'Neill B. C., F. Landis MacKellar, Lee Wexler, Wolfgang Lutz (2001) "Population and Climate Change" International Institute for Applied Systems Analysis. Cambridge University Press

- Organización Mundial de la Salud. WHO/UNEP "Health and Environment Linkages" Initiative, Ginebra, OMS, 2006. <http://www.who.int/heli/risks/climate/climatechange>
- Orr, J.C., V.J. Fabry, O. Aumont, L. Bopp, S.C. Doney, R.A. Feely, A. Gnanadesikan, N. Gruber, A. Ishida, F. Joos, R.M. Key, K. Lindsay, E. Maier-Reimer, R. Mearns, P. Monfray, A. Mouchet, R.G. Najjar, G.K. Plattner, K.B. Rodgers, C.L. Sabine, J.L. Sarmiento, R. Schlitzer, R.D. Slater, I.J. Totterdell, M.F. Weirig, Y. Yamanaka y A. Yool, (2005) "Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms". *Nature*, 437, 681- 686.
- Ortiz Pérez M.A. y Ana P. Méndez Linares. (1999) "Escenarios de vulnerabilidad por ascenso del nivel del mar en la costa mexicana del Golfo de México y el Mar Caribe". *Investigaciones Geográficas* 39: 68-81. Instituto de Geografía UNAM.
- Ortiz Pérez M.A. y Ana P. Méndez Linares. (2000) "Repercusiones por ascenso del nivel del mar en el Litoral del Golfo de México" en: México, una visión hacia el siglo XXI. *El Cambio Climático en México*. Instituto de Geografía, UNAM.
- Ortiz, P.M.A., y A.P. Méndez, (2000). Componentes naturales y de uso del suelo vulnerables a las variaciones del nivel del mar en la costa atlántica de México. *Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 41: 46-61
- Ostrom, E., and H. Nagendra. 2006 Insights on Linking Forests, Trees, and People from the Air, on the Ground, and in the Laboratory. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 103(51):19224–19231. <http://www.pnas.org/content/vol103/issue51/?ck=nck>
- Otterson G. B., Palenque, A. Belgrano, E. Post, P. C. Reid y N.C. Stenseth (2001) "Ecological effects of the North Atlantic Oscillation". *Oecologia* 128: 1-14
- Overpeck J., J. Cole y P. Bartlein (2005) "A Paleoperspective on Climate Variability y Change" in: *Climate Change y Biodiversity* (2005) Lovejoy T.E., y Hannah Lee (eds), Yale University; pp 418.
- Overpeck, J.T., B.L. Otto-Bliesner, G.H. Miller, D.R. Muhs, R.B. Alley y J.T. Kiehl, (2006) "Paleoclimatic evidence for future ice-sheet instability y rapid sea-level rise". *Science*, 311, 1747-1750.
- Pagliola S., J. Bishop y N. Lander-Mills. Coomp. "La venta de servicios ambientales forestales". INE, Semarnat. (2006).
- Pannier, F. 1992. El ecosistema de manglar como indicador de cambios globales en la zona costera tropical. *Ciencia* (43) Número especial: 111-113.
- Park, R. A. (1991) " Testimony before the Subcommittee on Health y Environment U.S. House of Representatives". *Global Climate Change y Greenhouse Emissions*, SN 102-154, 171-182.
- Parker, D.E., P.D. Jones, C.K. Folland, and A. Bevan, (1994) Interdecadal changes of surface temperature since the late 19th century. *Journal of Geophysical Research*, 99, 14373-14399
- Parnes C y Yohe (2003) "A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems". *Nature* 421: 37-42
- Parnes Camille (2005) "Swtection at multiple Levels: Euphydryas editha y Climate Change" pp. 56-59 in: T.E. Lovejoy y L. Hannah (eds.), *Climate Change y Biodiversity*. Yale University.
- Parnes, C. (1996). "Climate y species range". *Nature* 382, 765–766
- Parnes, C. Ryrholm, N., Steanescu, C. Hill, J. K., Thomas, C. D., Descimon, H., Huntley, B., Kaila, L., Kullberg, J., Tammaru, T., Tennent, W. J., Thomas, J. A. y Warren, M.. (1999). "Poleward shifts in geographical ranges of butterfly species associated with regional warming". *Nature* 399, 579–583
- Parry, M.L., C. Rosenzweig, A. Iglesias, M. Livermore and G. Fischer, (2004), Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenarios. *Global Environ. Change*, 14, 53-67.
- Patterson, K. (2000), *An Introduction to Applied Econometrics: A Time Series Approach*, Macmillan.



- Patz J., D. Campbell-Lendrum, T. Holloway and J.A. Foley (2005), Impact of regional climate change on human health, *Nature* 438, pp. 310-317.
- Patz, J., Olson, S. (2006) "Malaria risk and temperature: Influences from global climate change and local land use practices". National Academy of Sciences of the USA; 103: 5635-5636
- Pauly, D., J. Alder, A. Bakun, S. Heileman, K.H. Kock, P. Mace, W. Perrin, K. Stergiou, U.R. Sumaila, M. Vierros, K. Freire and Y. Sadovy, (2005) "Marine fisheries systems". *Ecosystems y Human Well-being: Volume 1: Current State y Trends*, R. Hassan, R. Scholes y N. Ash, Eds., Island Press, Washington, District of Columbia, 477-511.
- Pearce O y O Moran. (1994). "The economic value of biodiversity". IUCN. Londres. Reino Unido.
- Pearce, D.W. y S. Puroshothaman. (1992). "Protecting biological diversity. The economic value of farmaceutical plants"; Global Environmental Change Working paper 92-27. CSERGE University of East Anglia y University College London.
- Pearson, R.G. y T.P. Dawson, (2003) "Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelopemodells useful?" *Global Ecol. Biogeogr.*, 12, 361-371.
- Peñuelas J. y I. Filella (2001) "Responses to a warming world". *Science* 294: 793-795
- Pérez Septién Gabriela, (1998) "Turismo en las áreas naturales protegidas: valuación económica de los beneficios recreativos del santuario de el campanario." En: Aspectos económicos sobre la biodiversidad de México; Hesiquio Benítez Díaz, Eduardo Vega López, Arturo Peña Jiménez y Sophie Ávila Foucat (EDITORES); INE, SEMARNAT, CONABIO.
- Pérez-Gil Salcido, R., F. Jaramillo Monroy, A.M. Muñiz Salcedo, Marta Gabriela Torres Gómez. (1995). "Importancia económica de los vertebrados silvestres de México". PG7 Consultores, S.C./Conabio. México.
- Perman, R.J., Y. Ma, J. McGilvray and M. Common (2003) "Natural Resource and Environmental Economics" (Third edition), Addison Wesley Longman.
- Pérttega, S. y Pita, S. (2006). "Revisión sistemática y meta-análisis (II)". *Cad Aten Primaria* 2005.  
<http://www.fisterra.com/mbe/investigacion/metaanalisis/RSyMetaanalisis2.asp>
- Peterson A. T., J. Soberon, y V. Sanchez-Cordero (1999) "Conservatism of ecological niches in evolutionary time". *Science* 285: 1265-1267
- Peterson A. T., R. Scachetti-Pereira, y D. A. Kluza (2003b) "Assessment of invasive potential of *Homalodisca coagulata* in western North America y South America". *Biota Neotrópica* 3
- Peterson T., V. Sánchez Cordero, J. Soberón, J. Bartley, R. Buddemeier y A. Sanchez Navarro (2001). "Effects of global climate change on geographic distributions of Mexican Cracidae". *Ecological Modeling* 144: 21-30
- Peterson, A.T., M.A. Ortega-Huerta, J. Bartley, V. Sanchez-Cordero, J. Soberon, R.H. Buddemeier y D.R.B. Stockwell, (2002) "Future projections for Mexican faunas under global climate change scenarios". *Nature*, 416, 626-629.
- Pfaff, A., (1999). "What drives deforestation in the Brazilian Amazon?", *Journal Environmental Economic Management* 37, 26-43.
- Pina, C.M., (1994). Cited in Jakobsson y Dragun (1996b). "The economics of endangered species". Working - Paper, Swedish University Agricultural Sciences presented at the 7th Annual Conference of the EAFRE.
- Pitelka, L. F., et al. (1997). "Plant migration y climate change". *American Scientist* 85:464-473.
- Poirier, N. E., L. A. Whittingham, et al. (2003). "Effects of paternity and mate availability on mate switching in House Wrens." *The Condor* 105(4): 816-821.

- Polsky, C., D. Schröter, A. Patt, S. Gaffin, M.L. Martello, R. Neff, A. Pulsipher and H. Selin, (2003): *Assessing Vulnerabilities to the Effects of Global Change: An Eight- Step Approach*, 2003-05, Belfer Center for Science & International Affairs, Harvard University, Cambridge, Massachusetts, 31 pp. [Accessed 12.02.07: [http://www.bcsia.ksg.harvard.edu/BCSIA\\_content/documents/2003-05.pdf](http://www.bcsia.ksg.harvard.edu/BCSIA_content/documents/2003-05.pdf)]
- Pope, R.D. y R.E. Just (1991), "On Testing the Structure of Risk Preferences in Agricultural and Supply Analysis", *American Journal of Agricultural Economics*, 73, pp. 743-748.
- Pounds, J. A., Fogden, M. P. L. & Campbell, J. H. (1999). "Biological responses to climate change on a tropical mountain". *Nature* 398, 611-828.
- Price, C. and Rind, D. (1994), "The impact of a 2xCO<sub>2</sub> Climate on lightning-caused fires", *Journal of Climatology*, 7, 1484-1494.
- Prideaux, B. (1999), *Tourism perspectives of the Asian financial crisis: Lessons for the future*, Discussion web site: <http://divcom.otago.ac.nz:800/tourism/current-issues/homepage.htm>
- Prince, S.D., E.B. De Colstoun y L.L. Kravitz, (1998) "Evidence from rain-use efficiencies does not indicate extensive Sahelian desertification". *Global Change Biol.*, 4, 359-374.
- Qiu, D., T. Tanihata, H. Aoyama, T. Fujita, Y. Inaba and M. Minowa, (2002) "Relationship between a high mortality rate and extreme heat during the summer of 1999 in Hokkaido Prefecture, Japan". *J. Epidemiol.*, 12, 254-257.
- Quadri G. (2006) "El cambio climático en México y el potencial de Reducción de Emisiones por Sectores".
- Quah, D. T. (1996), *Ideas Determining Convergence Clubs*, Working Paper, Economics Department, LSE.
- Rahmstorf, S. (2008). A semi-empirical approach to projecting future sea-level rise, *Science*, 315, 368-70
- Ramirez, O.A. (1997), "Estimation and Use of a Multivariate Parametric Model for Simulating Heterocedastic Correlated Non Normal Random Variables: The Case of the Corn Belt, Soybean and Wheat Yields", *American Journal of Agricultural economics*, 79, February, pp. 191-205.
- Raven, J., K. Caldeira, H. Elderfield, O. Hoegh-Guldberg, P. Liss, U. Riebesell, J. Shepherd, C. Turley and A. Watson, (2005) "Ocean acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide". Policy document 12/05, The Royal Society, The Clyvedon Press Ltd, Cardiff, 68 pp.
- Reich P. B. (1995) "Phenology of tropical forests: Patterns, causes y consecuencias". *Canadian Journal of Botany* 73: 164-174
- Reilly, J., F.N. Tubiello, B. McCarl, D. Abler, R. Darwin, K. Fuglie, S. Hollinger, C. Izaurralde and Coauthors, 2003: U.S. agriculture and climate change: new results. *Climatic Change*, 57, 43-69.
- Reinsborough, M. (2003), "A Ricardian model of climate change in Canada", *Canadian Journal of Economics*, 36, pp. 21-40.
- Renshaw, (1991). "A Formula Plan for a More Volatile Stock Market," *Financial Analysts Journal*, January/February, 85-87.
- Reynaud, S., N. Leclercq, S. Romaine-Lioud, C. Ferrier-Pages, J. Jaubert y J.P. Gattuso, (2003) "Interacting effects of CO<sub>2</sub> partial pressure y temperature on photosynthesis y calcification in a scleractinian coral". *Global Change Biol.*, 9, 1660-1668.
- Ricciardi A, Rasmussen JB (1999) "Extinction rates of North American freshwater fauna" *Conservation Biology* 13 (5): 1220-1222.
- Ricciardi A., R. J. Neves y J. B. Rasmussen (1998) "Impeding extinctions of North American freshwater mussels (Unionoida) following the zebra mussel (*Dreissena polymorpha*) invasion". *Journal of Animal Ecology* 67: 613-619
- Richmond Amy, Robert K. Kaufmann, Ranga B. Myneni (2007) "Valuing ecosystem services: A shadow price for net primary production" *Ecological Economics*.

- Ricker Martin (1998) "Evaluación económica del enriquecimiento de la selva con especies nativas" En: Aspectos económicos sobre la biodiversidad de México; Hesiquio Benítez Díaz, Eduardo Vega López, Arturo Peña Jiménez y Sophie Ávila Foucat (EDITORES); INE, SEMARNAT, CONABIO.
- Riebesell U., I. Zondervan, B. Rost, P. D. Tortell, R. E. Zeebe, y F. M. M: Morel. (2000) "Reducer calcification of marine plankton in response to increased atmospheric CO<sub>2</sub>". *Nature* 407: 364-367
- Roberts, C.M., C.J. McClean, J.E.N. Veron, J.P. Hawkins, G.R. Allen, D.E. McAllister, C.G. Mittermeier, F.W. Schueler, M. Spalding, F. Wells, C. Vynne y T.B. Werner, (2002): "Marine biodiversity hotspots y conservation priorities for tropical reefs". *Science*, 295, 1280-1284.
- Rodriguez-Trelles F y M.A. Rodriguez (1998) "Rapid micro evolution and loss of chromosomal diversity in *Drosophila* in response to climate warming". *Evolutionary Ecology* 12: 829-838
- Root T. L., J. T. Price, K. R. Hall, S. H. Schneider, C. Rosenzweig, J.L. Pounds (2003) "Fingerprints of global warming on wild animals y plants" *Nature* 421: 57-60
- Rosales, J., Torres, B., Olaiz, G., Borja-Aburto, V. (2001) "Acute effects of air pollution on health: Evidence from epidemiological studies". *Salud Pública de México*, 43: 544-555.
- Rosenberg, N.J., R.A. Brown, R.C. Izaurralde and T.M. Thomson, (2003): Integrated assessment of Hadley Centre (HadCM2) climate change projections on agricultural productivity and irrigation water supply in the conterminous United States: I. Climate change scenarios and impacts on irrigation water supply simulated with the HUMUS model. *Agric. For. Meteorol.*, 117, 73-96.
- Rosenzweig C. y A. Iglesias, eds. (1994). *Implications of Climate Change for International Agriculture: Crop Modeling Studies*. Report No. EPA 230-B-94-003. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., USA.
- Rosenzweig, C. and Parry, M. L.: (1994), 'Potential Impact of Climate Change on World Food Supply', *Nature* 367, 133-138.
- Rosenzweig, C., F.N. Tubiello, R. Goldberg, E. Mills and J. Bloomfield, (2002): Increased crop damage in the US from excess precipitation under climate change. *Global Environ. Change*, 12, 197-202.
- Ross, M., Persky, V., Scheff, P., Chung, J., Curtis, L., Ramakrishnan, V., Wadden, R. Hryhorczuk, D. (2002) "Effect of ozone and aeroallergens on the respiratory health of asthmatics" *Archives of Environmental Health*, 57: 568-578.
- Roy K. y J. M. Pandolfi (2005) "Responses of Marine Species y Ecosystems to Past Climate Change" pp. 160-175 in: T.E. Lovejoy y L. Hannah (eds.), *Climate Change y Biodiversity*. Yale University Press, New Haven CT.
- Ruitenbeek, H.J. (1992). "Mangrove Management: An Economic Analysis of Management Options with a Focus on Bintuni Bay, Irian Jaya". EMDI Environmental Report No 8: Jakarta: EMDI.
- Rzedowski, J. (1978). *Vegetación de México*, Ed. Liriusa, México.
- Rzedowski, J. (1998). "Diversidad y orígenes de la flora fanerogámica de México". Pp. 129-145. en: *Diversidad biológica de México. Orígenes y distribución*. (T.P. Ramamoorthy, R. Bye, A. Lot y J. Fa, eds.). Instituto de Biología, UNAM.
- Safari Internacional (2006), *Abatimiento de especies de caza mayor y menor* <http://www.safariinternational.com>,
- Sadovy, Y., (2005) "Trouble on the reef: the imperative for managing vulnerable y valuable fisheries". *Fish Fish.*, 6, 167-185.
- Sagarpa-Siap (2007), "Anuarios estadísticos agricultura, ganadería, pesca". SAGARPA
- Sala, O.E., (2005) "Biodiversity across scenarios. Ecosystems y Human Well being: Volume 2": Scenarios, S. Carpenter, P. Pingali, E. Bennett y M. Zurek, Eds., Island Press, Washington, District of Columbia, 375-408.
- Sala-i-Martin, X. (1996). *Regional Cohesion: Evidence and Theories of Regional Growth and Convergence*, *European Economic Review*, Vol. 40, pp. 1325-1352.

- Sánchez-Blanco M.J., A. Torrencillas y J.C. Soler (1989), "Efecto del riego en la alternancia productiva de los críticos", *Fruticultura profesional*, no. 21.
- Sánchez-Cordero, V., P. Illoldi-Rangel, M. Linaje, S. Sarkar, A. Townsend Peterson. 2005. Deforestation and extant distributions of Mexican endemic mammals. *Biological Conservation* 126:465-473
- Sandoval, V. y P. Real. (2005). "Modelamiento y prognosis estadística y cartográfica del cambio en el uso de la tierra". *Bosques*, 26(1):55-63.
- Sanghi A, R. Mendelsohn y A. Dinar (1998), "The climate sensitivity of Indian agriculture", en Dinar, A. et al. (eds), 1998. *Measuring the Impact of Climate Change on Indian Agriculture*. World Bank Technical, 402. World Bank, Washington, DC.
- Sanjurjo Rivera, E. e Y. Carrillo Guerrero. (2006). "Beneficios económicos de los flujos de agua en el delta del Río Colorado: consideraciones y recomendaciones iniciales". *Gaceta ecológica* 80. Instituto Nacional de Ecología. México: 51-62
- Sanjurjo, E. & S. Welsh. (2005). "Una descripción del valor de los bienes y servicios ambientales prestados por los manglares". En Instituto Nacional de Ecología, *Gaceta Ecológica INE* Num. 75. pp 55-68.
- Santos-Burgoa, C., Rojas Bracho, L., Rosas Pérez, I., Ramírez Sánchez A., Sánchez Rico, G. y Mejía Hernández S. (1998); "Modelaje de exposición a partículas en población general y riesgo de enfermedad respiratoria". *Gaceta Médica de México*, 134: 407-418.
- Sarah A. Laird y Kerry ten Kate (2006) "Los nexos entre la bioprospección y la conservación forestal" cap. 10, 273-302 en: Pagliola S., J. Bishop y N. Lander-Mills. *Coomp. La venta de servicios ambientales forestales*. INE, Semarnat.
- SARH, (1992). *Inventario Forestal Nacional de Gran Visión. Reporte principal*. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Subsecretaría Forestal y de Fauna Silvestre, México, 49 pp.
- Scharroo, R. (2005), "Satellite altimetry and the intensification of hurricane Katrina". *EOS Transactions of the American Geophysical Union* 86:366-367.
- Schellnhuber, H.J., et al. (eds.) (2004), *Earth System Analysis for Sustainability*, MIT Press, Cambridge, MA.
- Schlenker, Wolfram, W. Michael Hanemann, and Anthony C. Fisher (2005a): "Will U.S. Agriculture Really Benefit from the Global Warming? Accounting for Irrigation in the Hedonic Approach," *American Economic Review*, 95(1): 395-406.
- Schlenker, Wolfram, W. Michael Hanemann, and Anthony C. Fisher (2005b): "The Impact of Global Warming on U.S. Agriculture: An Econometric Analysis of Optimal Growing Conditions," *Review of Economics and Statistics*.
- Schmidt (2005), "Hurricanes and Global Warming - Is There a Connection?" en: [www.realclimate.org/index.php/archives/2005/09/](http://www.realclimate.org/index.php/archives/2005/09/)
- Schmitt T, Hewitt G. (2004) "The genetic pattern of population threat y loss: a case study of butterflies." *Mol Ecol.* ;13 :21-31.
- Schwartz M. D. (1998) "Green- wave phenology". *Nature* 394: 839-840.
- Schwartz, E., Sadetzki, S., Murad, H., Raveh, D. (2001) "Age as a Risk Factor for Severe Plasmodium falciparum Malaria in Nonimmune Patients". *Clinical Infectious Diseases*,; 33: 1774-1777
- Schwartz, J. (1994) "Air pollution and daily mortality: A review and meta-analysis". *Environ Res*,; 64: 36-52.
- Schwartz, M. W. (1992). "Potential effects of global climate change on the biodiversity of plants". *Forestry Chronicle* 68:462-471.
- Scott, G.M. and R.D. Diab, (2000) "Forecasting air pollution potential: a synoptic climatological approach". *J. Air Waste Manage.*, 50, 1831-1842.

- Secretaría de Energía–Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SENER-SEMARNAT) (2002), Programa: Energía y medio ambiente hacia el desarrollo sustentable, México.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos (SEMARNAT) (2003), Informe de la situación del medio ambiente en México 2002,
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos (SEMARNAT) (2005), “Tercera Comunicación nacional sobre Cambio Climático”. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos (SEMARNAT) (2007), “Estrategia Nacional de Cambio Climático”. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales - Instituto Nacional de Ecología (SEMARNAT-INE) (2006a), Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990-2002, México.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales - Instituto Nacional de Ecología (SEMARNAT-INE) (2006b), México 3a Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, Comité Intersecretarial sobre Cambio Climático.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales - Instituto Nacional de Ecología (SEMARNAT-INE) (2001) “México 2ª. Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático”. Instituto Nacional de Ecología.
- Secretaría de Turismo (2007). Página de la Secretaría de Turismo: [http://mexico-travel.com/mexico/owasectur.p\\_principal?p\\_idi=1&p\\_login=&p\\_version=HTML-632607](http://mexico-travel.com/mexico/owasectur.p_principal?p_idi=1&p_login=&p_version=HTML-632607).
- Sedjo R. A. y K. S. Lyon (1990) “The long-term Adequacy of World Timber Supply”. Washington, D. C: Johns Hopkins University Press.
- Sedjo R. A: (1990) “The Nation’s Forest Resources”. Discussion Paper ENR 90-07. Washington D. C.
- Seibel, B. A. y Walsh (2001) “potential impacts of CO2 injection on deep.sea biota”. *Science* 294: 319-320
- Seo SN, Mendelsohn R & Munasinghe M, (2005). Climate change impacts SIVAKUMAR MVK, 1992. Climate change and implications for agriculture in Niger. *Climate Change* 20: 297–312.
- Shelling T. (1992), “Some Economics of Global Warming”, *American Economic Review*, 82(1): 1-14
- Sheppard, C.R.C., (2003) “Predicted recurrences of mass coral mortality in the Indian Ocean”. *Nature*, 425, 294-297.
- Siegenthaler, U., Stocker, T. F., Monnin, E., Lüthi, D., Schwander, J., Stauffer, B., Raynaud, D., Barnola, J.M., Fischer, H., Masson-Delmotte, V., Jouzel, J. (2005). Stable carbon cycle-climate relationship during the Late Pleistocene. *Science*, 310, 1313- 1315
- Silman M. R., J. T. Terborgh, y R. A. Kiltie (2003) “Population regulation of a rainforest dominant tree by a major seed predator”. *Ecology* 84: 431 – 438
- Simpson, R., Sedjo, R.A., Reid, J.W., (1994). “Valuing biodiversity for use in pharmaceutical research”. *Journal of Political Economy* 101, 163–185.
- Sinclair, M.T. (1998), “Tourism and economic development: A survey”, *Journal of Development Studies*.
- Sohngen, B. and Sedjo, R., 2005: Impacts of climate change on forest product markets: implications for North American producers. *Forest Chron.*, 81, 669-674.
- Solow, R. (1956). “A Contribution to the Theory of Economic Growth,” *Quarterly Journal of Economics*, 70, 65-94.
- Song, H. y S.F. Witt (2000), *Tourism demand modelling and forecasting: Modern econometric approaches*, Editorial Amsterdam, New York, Pergamon.

- Southward, A. J., Hawkins, S. J. & Burrows, M. T. (1995). "Seventy years' observations of changes in distribution y abundance of zooplankton y intertidal organisms in the western English Channel in relation to rising sea temperature". *J. Thermal Biol.* 20, 127–155
- Soytas, U. y R. Sari (2003), "Energy consumption and GDP: Causality relationship in G-& countries and emerging markets", *Energy Economics*, 25, 33-37.
- Spadaro, J.V. y Rabl, A. (1998b) "Estimates of real damage from air pollution: site dependence and simple impact indices for LCA", *International Journal of Life Cycle Analysis*, 4(4): 229-243.
- Spadaro, J.V. y Rabl, A. (1998a) "Air pollution damage estimates: the cost per kg of pollutant". *Ecoles des Mines. París.*
- Spadaro, J.V. y Rabl, A. (1999a), *Air pollution damage estimates: the cost per kg of pollutant. Ecole des Mines. París*
- Spalding, M. D., C. Ravilious y E. P. Green. *World Atlas of Coral Reefs.* WCMC-UNEP. University of California Press. Berkeley. USA. 2001.
- Spash, C.; Urama, K.; Burton, R.; Kenyon, W.; Shannon, P.; Hill, G (2006) "Motives behind willingness to pay for improving biodiversity in a water ecosystem: economics, ethics y social psychology". *Ecological Economics.*
- Speelman Stijn, et. al. (2008), "A measure for the efficiency of water use and its determinants, a case study of small-scale irrigation schemes in North-West Province, South Africa", *Agricultural Systems*, 98, pp. 31–39
- Stern N. (2006), "The Stern Review on the Economics of Climate Change". H M Treasury
- Stern N. (2007), *The Economics of Climate Change: The Stern Review.* Cambridge University Press.
- Stern, D.I. y C.J. Cleveland (2003), "Energy and economic growth". en *Encyclopedia of energy*, D.I. Stern y C.J. Cleveland (eds.) Academic Press, San Diego, CA.
- Stern, N. H., S. Peters, V. Bakhshi, A. Bowen, C. Cameron, S. Catovsky, D. Crane, S. Cruickshank, S. Dietz, N. Edmonson, S.-L. Garbett, L. Hamid, G. Hoffman, D. Ingram, B. Jones, N. Patmore, H. Radcliffe, R. Sathiyarajah, M. Stock, C. Taylor, T. Vernon, H. Wanjie, and D. Zenghelis, 2006. *Stern Review: The Economics of Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Straton A. 2006. The joint outcomes of a "citizens' jury" workshop in North Sulawesi, Indonesia. *Evaluation Journal of Australasia* 6(2): 16-24.
- Sur, D., P. Dutta, G.B. Nair and S.K. Bhattacharya, (2000) "Severe cholera outbreak following floods in a northern district of West Bengal". *Indian J. Med. Res.*, 112, 178-182.
- Swinton, S. y R.P. King (1991), "Evaluating Robust Regression Techniques for Deterding Crop Yield Data with Non Normal Errors", *American Journal of Agricultural Economics*, 73, May, pp. 446-451.
- Tam, C., L. Rodrigues, S. O'Brien and S. Hajat, (2006) "Temperature dependence of reported *Campylobacter* infection in England, 1989–1999". *Epidemiol. Infect.*, 134, 119-125.
- Taylor C. A., M. L. Warren, J. F. Fitzpatrick, h. H. Hobbs, R. F. Jezerinac, W. L. Pflieger, y H. W. Robison (1996) "Conservation status of crayfishes of the United States y Canada". *Fisheries* 21(4): 25-38.
- Taylor F. (1981) "Ecology y evolution of physiological time in insects". *American Naturalist* 117: 1-23
- Thomas Axel. (2008), "Agricultural irrigation demand under present and future climate scenarios in China", *Global and Planetary Change*, 60, pp. 306–326
- Thomas, C. D. andLennon, J. J. (1997). "Birds extend their ranges northwards". *Nature* 399, 213
- Thomas, C.D., (2005) "Recent evolutionary effects of climate change". T.E. Lovejoy y L. Hannah, Eds. *Climate Change y Biodiversity.* Yale University Press, New Haven, Connecticut, 75-90.



- Thomas, C.D., A. Cameron, R.E. Green, M. Bakkenes, L.J. Beaumont, Y.C. Collingham, B.F.N. Erasmus, M.F. de Siqueira, A. Grainger, L. Hannah, L. Hughes, B. Huntley, A.S. van Jaarsveld, G.F. Midgley, L. Miles, M.A. Ortega- Huerta, A.T. Peterson, O.L. Phillips y S.E. Williams, (2004a) "Extinction risk from climate change". *Nature*, 427, 145-148.
- Thomas, C.D., E. J. Bodsworth, R. J. Wilson, A. D. Simmons, Z. G. Davies, M. Musche, y L. Conradt. (2001) "Ecological y evolutionary processes at expanding range margins". *Nature* 411: 577-581
- Thompson D. B. A., P. S. Thompson y D. Nethersole- Thompson (1986) "Timing of breeding y breeding performance in a population of greenshank". *Journal of Animal Ecology* 55: 181-199
- Thomson, A.M., R.A. Brown, N.J. Rosenberg and R.C. Izaurralde, (2005): Climate change impacts for the conterminous USA: An integrated assessment. Part 5: Irrigated agriculture and national grain crop production. *Clim. Change*, 69, 89-105.
- Thuiller, W., G.F. Midgley, G.O. Hughes, B. Bomhard, G. Drew, M.C. Rutherford y F.I. Woodward, (2006b) "Endemic species y ecosystem sensitivity to climate change in Namibia". *Global Change Biol.*, 12, 759-776.
- Tivy, J. (1990), *Agricultural ecology*. Longman Scientific y Technical, London.
- Tol R., (1993), "The climate Fund: Survey of Literature on Cost and Benefits", Working Document W93/01, Free University of Amsterdam
- Tol, Richard S.J. (2002), "Estimates of the Damage Costs of Climate Change" *Environmental and Resource Economics* 21 pages 47-73
- Torres J. M. (2005), "Análisis de los servicios ambientales 2", Capítulo 3 del Plan Estratégico Forestal México 2025, BID
- Torres Rojo, Juan Manuel y Alejandro Guevara Sanginés. "El potencial de México para la producción de servicios ambientales: captura de carbono y desempeño hidráulico". *Gaceta Ecológica*. Instituto Nacional de Ecología. abril-junio. Num 63. pp. 40-59.
- Torres-Rojo, Octavio S. Magaña-Torres y Grodecz A. Ramírez-Fuentes (2007), "Índice de peligro de incendios forestales de largo plazo", *Agrociencia* 41: 663-674. 2007
- Touval, J.L. (1992). "Analysis of Economic Impacts Resulting from Ecotourism at El Triunfo Biosphere Reserve, Chiapas, Mexico". Baltimore: University of Maryland.
- Trenberth K. and D. Shea, (2005), Relationship between precipitation and surface temperature, *Geophysical Research Letters*,
- Troy Austin, Matthew A. Wilson (2006) "Mapping ecosystem services: Practical challenges y opportunities in linking GIS y value transfer". *Ecological Economics* 60: 435-449
- Tubiello, F.N. and G. Fischer, (2006): Reducing climate change impacts on agriculture: global and regional effects of mitigation, 2000-2080. *Techol. Forecast. Soc.*, doi: 10.1016/j.techfore.2006.05.027.
- Turgeon D. D., J. F. Quinn, A. E. Bogan, E. V. Coan, F. G. Hochberg, W. G. Lions, P. M. Mikkelsen, R. J. Neves, C. F. E. Roper, G. Rosenberg, B. Roth, A. Scheltema, F. G. Thompson, M. Vecchione, y J. D. Williams (1998) "Common y scientific names of aquatic invertebrates from the United States y Canada: Mollusks 2a Ed. Special publication 26". *American Fisheries Society*, Bethesda, Maryland.
- Turnock W.J., Boivin G. & Ring R.A. (1998): Interpopulation differences in the coldhardiness of *Delia radicum* (Diptera: Anthomyiidae). *Can. Entomol.* 130: 119-129.
- Turpie K., B.J. Heydenrych y S.J. Lamberth, (2003) "Economic value of terrestrial y marine biodiversity in the Cape Floristic Region: Implications for defining effective y socially optimal conservation strategies" *Biological Conservation* 112
- UICN, (1996) "IUCN Red List of Threatened Animals". Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza, Gland, Suiza.

- UICN, (1998). "IUCN Red List of Threatened Database Search Results". [www.wcmc.org.uk/cgi-bin](http://www.wcmc.org.uk/cgi-bin).
- UNEP United Nations Environment Program, (1992). "Rio Declaration, World Conference on Environment y Development", United Nations Environment Program, Brazil.
- UNEP (1992) "Negotiating Committee for a Convention on Biological Diversity seventh negotiating session" UNEP, ([http://weblis.unep.org/cgi-bin/isis3w.exe?vq\\_query=D=Biological%20diversity&database=LIBCAT&search\\_type=view\\_query\\_search&table=liba&lang=eng&format\\_name=EMALL&page\\_header=EPHALL](http://weblis.unep.org/cgi-bin/isis3w.exe?vq_query=D=Biological%20diversity&database=LIBCAT&search_type=view_query_search&table=liba&lang=eng&format_name=EMALL&page_header=EPHALL))
- UNWTO, (2008), "Climate Change and Tourism – Responding to Global Challenges"
- Valentine J. W. y Jablonski (1993) "Fossil communities: Compositional variation at many time scales. In: Species Diversity in Ecological Communities, ed. R. E. Ricklefs y D. Schlüter, 341-349. Chicago: University of Chicago Press.
- Vandentorren, S., Suzan, F., Medina, S. Pascal, M., Maulpoix, A., Cohen, J. and Ledrans, M. (2004) "Mortality in 13 French Cities During the August 2003 Heat Wave". *American Journal of Public Health*; 94, 9: 1518 – 1520.
- Veiga Neto, F.C. (2006). "Análise de Incentivos Econômicos nas Políticas Públicas para o Meio Ambiente – O caso do 'ICMS Ecológico' em Minas Gerais". Tesis de maestría, CPDA. Rio de Janeiro: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.
- Velázquez, A., J.F. Mas, J.R. Díaz-Gallegos, R. Mayorgas-Saucedo, P.C. Alcántara, R. Castro, T. Fernández, G. Bocco, E. Ezcurra, y, J.L. Palacio. (2002). Patrones y tasas de cambio de uso del suelo. *INE, Gaceta Ecológica* No 062:21-37.
- Veldkamp, A. and E. F. Lambin. (2001). Predicting land-use change. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 85, 1-3, June 2001, Pages 1-6
- Visser, M. E., A. J. Vannoordwijk, J. M. Tinbergen y C. M. Lessells (1998) "Warmer springs lead to mistimed reproduction in great Tits (*parus major*). *Proceedings of the royal Society of London – Series B: Biological Science* 265: 1867 – 1870
- Vitousek, P.M., H.A. Mooney, J. Lubchenco y J.M. Melillo (1997). Human domination of Earth's ecosystems». *Science* 277: 494-499.
- Vollaard, A.M., S. Ali, H.A.G.H. van Asten, S. Widjaja, L.G. Visser, C. Surjadi and J.T. van Dissel, (2004) "Risk factors for typhoid and paratyphoid fever in Jakarta, Indonesia". *J. Am. Med. Assoc.*, 291, 2607-2615.
- Vovides, A. y G. Medina. (1994). "Relación de plantas mexicanas amenazadas de extinción". En: Flores-Villela, O. y P. Gerez. *Biodiversidad y conservación en México: vertebrados, vegetación y uso del suelo*. Conabio/ UNAM. México.
- Ward, J. K. y B. R. Strain (1999). "Elevated CO2 studies: Past, present y future". *Tree Physiology* 19: 211-220
- WCMC, (1992). "Global Biodiversity. Status o the Earth's Living Resources". Chapman y Hall. Londres.
- Wessels, K.J., B. Reyers and A. S. Van Jaarsveld. (2000) Incorporating land cover information into regional biodiversity assessments in South Africa. *Animal Conservation* 3:1, 67–79
- Whelan R. J. (1995), *The ecology of Fire*, Cambridge University Press
- Who. *The World Health Report* (2006). - working together for health
- Wilkinson, C., Ed., (2004): "Status of Coral Reefs of the World: 2004. Vols. 1 y 2." *Global Coral Reef Monitoring Network and Australian Institute of Marine Science, Townsville*, 303+557 pp.
- Williams J. D., M. L. Warren, K. S. Cummings, H. L. Harris, y R. J. Neves (1993) "Conservation Status of freshwater mussels of the United States y Canada". *Fisheries* 18(9): 6-22



- Williams J. E., J. E. Johnson, D. A. Hendrickson, S. Contreras-Balderas, J. D. Williams, M. Navarro-Mendoza, D. E. McAllister y J. E. Deacon (1989) "Fishes of North American endangered, threatened or of special concern: 1989". *Fisheries* 14(6): 3-20
- Willig, M.R., D.M. Kaufman y R.D. Stevens, (2003) "Latitudinal gradients of biodiversity: pattern, process, scale, y synthesis". *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.*, 34, 273-309.
- Wilson, E. O., (1988). "The current state of biological diversity". En: E. O. Wilson ed. *Biodiversity*, pp. 3-18. National Academ y Press, Washington, D. C. 521 pp.
- Wilson, R.J., C.D. Thomas, R. Fox, D.B. Roy y W.E. Kunin, (2004) "Spatial patterns in species distributions reveal biodiversity change". *Nature*, 432, 393-396.
- Wilson, R.J., D. Gutierrez, J. Gutierrez, D. Martinez, R. Agudo y V.J. Monserrat, (2005) "Changes to the elevational limits y extent of species ranges associated with climate change". *Ecol. Lett.*, 8, 1346-1346.
- Wooldridge, J.M. (2001), *Econometric Analysis of Cross Section and Panel Data*, MIT Press.
- Wooldridge, S., T. Done, R. Berkelmans, R. Jones y P.Marshall, (2005) "Precursors for resilience in coral communities in a warming climate: a belief network approach". *Mar. Ecol.–Prog. Ser.*, 295, 157-169.
- Woolhouse, M.E.J. and R. Harmsen. 1987. A transition matrix model of seasonal changes in mite populations. *Ecol. Model.* 37: 167-189.
- World Resources Institute (2006): *Climate Analysis Indicators Tool (CAIT) on-line database version 3.0.*, Washington, DC: World Resources Institute, available at: <http://cait.wri.org>.
- Worm B, Barbier E., Beaumont N., Duffy E., Folke C., Halpern B., Jackson JBC., Lotze H, Michell F., Palumbi S., Sala E., Selkoe K., Stachowics J., Watson R. (2006) *Impacts of Biodiversity on Ocean Ecosystem Service*. *Science* 3.
- Wunder, S. (2001). "Poverty Alleviation in Tropical Forests, What Scope for Synergies?", *World Development* 29.
- Yamaji, K., R. Matsushashi, Y. Nagata, Y. Kaya, (1991): "An integrated systems for CO<sub>2</sub> /Energy/GNP Analysis: Case studies on economic measures for CO<sub>2</sub> reduction in Japan. Workshop on CO<sub>2</sub> Reduction and Removal: Measures for the Next Century", International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg. 19-21.
- Yarnal, B., A.C. Comrie, B. Frakes and D.P. Brown, (2001) "Developments and prospects in synoptic climatology". *Int. J. Climatol.*, 21, 1923-1950.
- Yu, E.S.H. y B.K. Hwang (1984). "On the relationship between energy and GNP: Further results", *Energy Economics*, 6, 186-190.
- Zhang, H, Henderson-Sellers, A, McGuffie, K. (2001) "The compounding effects of tropical deforestation y greenhouse warming on climate." *Clim. Change* 49: 309.
- Zhang, J., Hu, W., Wei, F., Wu, G., Korn, L. Chapman, R. (2002) "Children's Respiratory Morbidity Prevalence in Relation to Air Pollution in Four Chinese Cities". *Environmental Health Perspectives*, 110: 961-967.
- Zhou, L., C.J. Tucker, R.K. Kaufmann, D. Slayback, N.V. Shabanov y R.B.Myneni, (2001) "Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999". *J. Geophys. Res.–Atmos.*, 106, 20069-20083.