



La impresión de este libro fue posible gracias al apoyo del Instituto de Ciencia y Tecnología del Distrito Federal y el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM, a través del Centro Virtual de Cambio Climático de la Ciudad de México.

Primera edición: 2010

D.R. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)
Ciudad Universitaria, 04510, México D.F.

Prohibida su reproducción total o parcial por cualquier medio, sin autorización escrita del titular de los derechos patrimoniales.

ISBN
Impreso y hecho en México

Diseño editorial, diseño de portada y cuidado de edición:
Prueba de Galera: Consultoría de Expresión. www.pruebadegalera.com

Economía del **Cambio Climático** en la Ciudad de México

AGRADECIMIENTOS

Los resultados aquí presentados provienen del proyecto “La Economía y Política del Cambio Climático en la Ciudad de México”, financiado por el Instituto de Ciencia y Tecnología del Distrito Federal y el Centro Virtual de Cambio Climático de la Ciudad de México. Los autores agradecen los comentarios del Dr. Manuel Mendoza Ramírez del Instituto Tecnológico Autónomo de México, así como del Dr. Carlos Gay García y de la Dra. Amparo Martínez Arroyo del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México.

ÍNDICE

Presentación	8
Introducción	10
Generación de escenarios de población, producto interno bruto, efecto de isla de calor y temperatura para las dieciséis delegaciones en el periodo 2000-2100	15
Consideraciones generales	15
Reducción de escala de los escenarios socioeconómicos de IIASA	24
<i>Escenarios de población para el Distrito Federal y para las dieciséis delegaciones políticas</i>	24
<i>Escenarios de producto interno bruto para el Distrito Federal y para las dieciséis delegaciones políticas</i>	29
Modelo estocástico para la evaluación de los impactos potenciales de cambio climático en la Ciudad de México	38
Descripción técnica del modelo estocástico para la evaluación de los impactos potenciales de cambio climático en el Distrito Federal	42
<i>Generación de escenarios probabilísticos de cambio climático</i>	42
<i>El Principio de Máxima Entropía</i>	43
<i>Escenarios probabilísticos de cambio climático</i>	45
<i>Escenarios probabilísticos regionales de cambio climático</i>	46
<i>Modelación del efecto de la isla de calor</i>	47

Funciones de impacto del modelo estocástico para la evaluación de los impactos potenciales del cambio climático en el Distrito Federal	49
--	----

Valuación de los costos económicos del cambio climático en el Distrito Federal	53
Resultados	53
<i>Evaluación de posibles políticas internacionales para mitigar el cambio climático: costos potenciales del cambio climático en la economía del Distrito Federal bajo un escenario de inacción y distintos escenarios de estabilización de las concentraciones atmosféricas de GEI</i>	53
<i>Evaluación de posibles políticas locales para atenuar los impactos del cambio climático: costos potenciales del cambio climático en la economía del Distrito Federal bajo un escenario de inacción y distintos escenarios de reducción del efecto de la isla de calor</i>	64
<i>Evaluación de los impactos socioeconómicos potenciales del cambio climático por grado centígrado de incremento en la temperatura global</i>	68

Conclusiones	71
---------------------	-----------

Referencias	74
--------------------	-----------

Glosario	80
-----------------	-----------

Índice de figuras	86
--------------------------	-----------

PRESENTACIÓN

La Economía del Cambio Climático en la Ciudad de México presenta de manera rigurosa y concisa un tema nodal en la exploración de las consecuencias que tendrá este fenómeno sobre la ciudad, sus actividades y sus habitantes.

Partiendo de la economía del riesgo e incertidumbre, este trabajo integra conocimientos y herramientas de la investigación climática. Sus resultados ofrecen un enfoque interdisciplinario en un tema que debe ser considerado en las estrategias de acción que se elaboren ante el cambio climático.

Utilizando el Modelo Estocástico de Evaluación Integrada (M-CCA/UNAM), elaborado en el Centro de Ciencias de la Atmósfera, se muestran las posibles consecuencias económicas que tendría el cambio climático bajo diferentes escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero. Lo anterior proporciona elementos respecto a la conveniencia de adoptar determinados acuerdos internacionales de mitigación.

Este trabajo presenta escenarios socioeconómicos por delegación política que son consistentes con los escenarios de desarrollo regional y global, tecnológicos, de emisiones y de clima propuestos por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático. Esta escala de estudio posibilita el análisis de impactos en el producto interno bruto delegacional, así como las proyecciones del incremento en la pobreza por efecto del cambio climático durante el presente siglo.

La publicación de este trabajo contribuye a una reflexión imprescindible sobre las acciones y responsabilidades que deben asumir en el presente los tomadores de decisiones y la sociedad en su conjunto para afrontar el cambio climático en mejores condiciones. Sin duda, éste será el problema ambiental más importante que enfrentará la ciudad durante el presente siglo; por tanto, requerirá tanto la instrumentación conjunta de políticas a nivel internacional, nacional y local, como la consolidación de los vínculos entre sociedad, gobierno y academia a fin de diseñar y ejecutar estrategias para atenuar sus impactos.

Este libro surge de un proyecto realizado en el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM, dentro del Centro Virtual de Cambio Climático de la Ciudad de México, patrocinado por el Instituto de Ciencia y Tecnología del Gobierno del Distrito Federal.

Dr. Carlos Gay García

Coordinador del Centro Virtual
de Cambio Climático de la
Ciudad de México

Dra. María Amparo Martínez Arroyo

Directora del Centro de Ciencias
de la Atmósfera, UNAM

INTRODUCCIÓN

Las variaciones en el clima y en el tiempo meteorológico tienen un impacto considerable en diversas actividades económicas; la lista de sectores sujetos al riesgo climático es enorme, incluyendo energía, agricultura, agua, salud, biodiversidad, turismo, construcción, por mencionar algunos (Nordhaus y Boyer, 2000; Alaton *et al.*, 2002; Tol, 2002a y 2002b; Jewson y Brix, 2005; Stern, 2006; IPCC, 2007). Bajo condiciones de cambio climático, el riesgo que enfrentarán los agentes económicos, tanto por eventos catastróficos como no catastróficos, se incrementará de forma muy pronunciada (Swiss Re, 2002; IPCC, 2007). De acuerdo con la Convención Global para la Reducción de Riesgos del Banco Mundial (GFDRR, 2009), alrededor de 71% del Producto Interno Bruto (PIB) de México es susceptible de ser afectado por los impactos que el cambio climático podría ocasionar.

Entre los impactos físicos provocados por el incremento en las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero (GEI), se encuentran cambios en los patrones de precipitación y en las temperaturas global y regionales, posibles aumentos en frecuencia e intensidad de eventos extremos —como olas de calor, ciclones tropicales, sequías y lluvias torrenciales—, así como disminución en la disponibilidad de agua debido a menores precipitaciones en latitudes bajas y a la desaparición de glaciares tropicales. Estos cambios causarán impactos directos sobre recursos que están estrechamente relacionados con el bienestar humano, comprometiendo la calidad y el acceso a agua, alimentos y salud de una porción significativa de la población; por otra parte, podrían reducir de manera significativa las perspectivas de crecimiento de los países en desarrollo (Stern, 2006).

La valuación de los costos potenciales del cambio climático en la economía es un tema de investigación vigente, con importantes carencias de información y desarrollo de metodologías y herramientas apropiadas (Ackerman, 2008). Asimismo, es ampliamente aceptado que el conocimiento y los esfuerzos de investigación con los que se cuenta actualmente son insuficientes, en particular cuando se les compara con la dimensión del problema que representa el cambio climático (Tol, 2009).

A pesar de ello, en la literatura especializada se han reportado diversos esfuerzos para cuantificar los impactos potenciales del cambio climático tanto en la economía global como regional y, en algunos casos, por país (Nordhaus, 1991; Cline, 1992; Frankhauser, 1995; Tol, 1995 y 2002ab; Mendelsohn *et al.*, 2000; Nordhaus y Boyer, 2002; Hope, 2006; Nordhaus, 2006, entre otros). Estas estimaciones deben ser consideradas como indicativas y ser interpretadas con precaución, pues la evolución tanto del clima como de los factores socioeconómicos durante el presente siglo son intrínsecamente inciertos, y nuestra capacidad para modelarlos es insuficiente (Stern, 2006; Tol, 2009). Dichas estimaciones, sin embargo, ayudan a entender la dimensión de los riesgos que el cambio climático implica y a orientar la toma de decisiones respecto a la conveniencia de adoptar opciones de mitigación y adaptación.

Las estimaciones de los costos que el cambio climático podría tener sobre la economía global y regional que han recibido mayor atención son, sin duda, las presentadas en el Reporte Stern sobre la Economía del Cambio Climático. En dicho reporte se ofrece una valuación económica a nivel global del costo de los impactos potenciales del cambio climático, así como de los costos y beneficios de la mitigación y la adaptación. Las conclusiones son contundentes: el cambio climático equivaldría a perder entre 5% y 20% del PIB mundial anual, todos los años, de aquí en adelante, mientras que los costos para mitigar sus peores impactos representan tan sólo 1% del PIB mundial anual. Más todavía, los impactos no se distribuirán uniformemente entre los países ni a su interior: serán más severos sobre las regiones y sectores sociales con menor disponibilidad de recursos y con menores niveles de flexibilidad para enfrentarlo (Stern, 2006; IPCC, 2007; Tol, 2009).

De esta forma, el calentamiento global —que es reconocido como el problema ambiental más serio que enfrentará la humanidad en este siglo (Stern, 2006; IPCC, 2007)— exacerbará los problemas socioeconómicos de forma importante en las regiones en desarrollo. Este fenómeno plantea nuevos retos para la sociedad, la administración pública, la generación de políticas y la toma de decisiones debido a características como la dimensión de los impactos socioeconómicos que podría generar, sus impactos sobre las finanzas públicas, el retraso o incumplimiento de las metas de reducción de pobreza y de desarrollo, las decisiones intergeneracionales que involucra y la toma de decisiones en el presente bajo incertidumbre profunda, por mencionar algunas.

Así, obtener estimaciones desagregadas por país y por regiones o estados dentro del mismo, resulta de gran importancia. Atendiendo esta necesidad, en 2009 la Secretaría de Hacienda y Crédito Público, junto con la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, publicó el estudio *La Economía del Cambio Climático en México* (SHCP-SEMARNAT, 2009). En dicho estudio se concluye que, utilizando una tasa de descuento de 4%, los costos totales por cambio climático acumulados hasta el 2100 para el país representarían alrededor de 7.68% del PIB actual, incluyendo los sectores agrícola, agua, uso de suelo, biodiversidad, turismo internacional, pecuario y biodiversidad indirecto. Si bien estas estimaciones representan una primera aproximación de los costos del cambio climático en México, es de notarse que —de acuerdo con dicho estudio— el costo total de todos los impactos del cambio climático en México durante un siglo sería comparable con alguna de las crisis económicas que se han presentado en nuestro país, aunque mucho menor que el costo de la crisis de 2008-2009. Claramente estos resultados se encuentran considerablemente por debajo de las estimaciones globales y regionales disponibles (Nordhaus y Boyer, 2002; Nordhaus, 2006; Stern, 2006; Hope, 2006, Tol, 2009). De hecho, la valuación de costos presentada en el estudio *La Economía del Cambio Climático en México* justificaría económicamente poca o ninguna acción para mitigar cambio climático.

Los resultados obtenidos mediante el Modelo Estocástico de Evaluación Integrada del Centro de Ciencias de la Atmósfera (M-CCA/UNAM; Estrada *et al.*, 2010) confirman que los costos del cambio climático para México podrían haber sido severamente subestimados. De acuerdo con estimaciones preliminares del M-CCA/UNAM, los impactos acumulados hasta el 2100 por el cambio climático podrían representar entre veinte y cuarenta veces el PIB actual de México. Este monto equivaldría a perder más de 3% del PIB todos los años desde el 2001 hasta el 2100. Cabe señalarse que esta cifra es comparable (y en algunos casos superior) a las tasas promedio anuales de crecimiento del PIB durante los últimos cinco sexenios.

El caso de la Ciudad de México resulta de gran interés no sólo por la importancia económica que tiene para el país (que reporta alrededor de 20% del PIB nacional), sino porque en ella se da una mezcla de factores socioeconómicos—la densidad poblacional, la creciente demanda de servicios, la concentración del ingreso y altos niveles de pobreza, entre otros— que podrían hacerla especialmente vulnerable, así como factores físicos como el nivel de urbanización, los asenta-

mientos irregulares y el cambio de uso de suelo, que podrían exacerbar los efectos negativos del cambio climático. Resulta entonces imperativo estudiar los costos potenciales del cambio climático para la ciudad a fin de estimar su impacto en las finanzas públicas, así como orientar la toma de decisiones y la creación de políticas públicas.

Con el apoyo del Instituto de Ciencia y Tecnología del Distrito Federal (ICyTDF), a través del Centro Virtual de Cambio Climático de la Ciudad de México (CVCCCM), se desarrolló un modelo estocástico de evaluación integrada para el Distrito Federal, basado en el M-CCA/UNAM y el modelo PAGE2002 (Hope, 2006), utilizado en el Reporte Stern. El modelo produce escenarios probabilísticos de clima, impactos y costos para las delegaciones del Distrito Federal, utilizando diferentes escenarios de emisiones de GEI y emulando una variedad de modelos de clima; su fin es integrar la incertidumbre tanto en las proyecciones de la temperatura global como en las regionales. Asimismo, el modelo considera factores característicos de la ciudad, como el efecto de la isla de calor, sus microclimas y las diferencias socioeconómicas y demográficas más importantes entre las distintas delegaciones.

En este documento se presentan estimaciones de los costos del cambio climático para el Distrito Federal bajo un escenario de inacción y bajo distintos escenarios de política, en los que se incluye tanto la instrumentación de acciones internacionales como locales. Así, por ejemplo, considerando una tasa de descuento cero y un escenario de inacción, los costos acumulados de cambio climático durante este siglo para el Distrito Federal podrían representar hasta 46 veces el PIB actual de la entidad, con una media de diecinueve veces. Más aún, las estimaciones muestran que para el 2100 el cambio climático podría acarrear, como consecuencia directa, el aumento de más de un millón de personas en pobreza en caso de carecer de políticas adicionales para enfrentar el fenómeno y para reducción de la pobreza.

Los costos potenciales que implica el cambio climático para la ciudad sin duda obligan a buscar alternativas que permitan reducir el riesgo que ésta enfrentaría. Entre ellas se incluyen las dirigidas a la reducción global de las emisiones globales de GEI y las locales, enfocadas a mejorar las condiciones ambientales (por ejemplo, reducción de los efectos de la isla de calor, reforestación y recuperación de cuerpos de agua) y socioeconómicas, como es mejorar la distribución del ingreso,

reducir las diferencias socioeconómicas y de nivel de desarrollo entre delegaciones, y mejorar las capacidades de la población e infraestructura para enfrentar el cambio climático.

Los resultados permiten concluir que el cambio climático sin duda plantea el mayor reto ambiental que la ciudad enfrentará en el presente siglo, causando impactos significativos en diversos sectores y con profundas implicaciones socioeconómicas. La dimensión de los impactos económicos del cambio climático podría constituir una seria limitante para alcanzar cualquier meta de crecimiento económico, desarrollo y de avance en el bienestar social.

Generación de escenarios de población, producto interno bruto, efecto de isla de calor y temperatura para las dieciséis delegaciones en el periodo 2000-2100

En esta sección se presentan las metodologías usadas para generar escenarios correspondientes a las diversas variables físicas y socioeconómicas requeridas para realizar la valuación de los impactos potenciales del cambio climático para cada una de las delegaciones del Distrito Federal.

Consideraciones generales

Special Report on Emissions Scenarios y los escenarios espacialmente explícitos del International Institute of Applied Systems Analysis¹

El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) publicó en 2000 el Reporte Especial sobre Escenarios de Emisiones (SRES por sus siglas en inglés; Nakicenovic, *et al.*, 2000) que representa la tercera generación de escenarios utilizados por el Panel. Estos nuevos escenarios reemplazaron a los escenarios elaborados por el IPCC en 1992, denotados como IS92 (a hasta f), y permanecen vigentes desde entonces; fueron utilizados tanto en el Tercer Reporte de Evaluación (TAR), como en el Cuarto Reporte de Evaluación (AR4). En septiembre de 2007, el IPCC comenzó los trabajos con la comunidad científica para la generación de los nuevos escenarios para el análisis de emisiones, cambio climático, impactos y estrategias de respuesta que serán utilizados en el Quinto Reporte de Evaluación, previsto para el 2014.²

El SRES es producto de un proceso abierto en el que participó un equipo multidisciplinario internacional compuesto por más de cincuenta personas de dieciocho países en grandes centros internacionales de modelación, y que se nutrió de comentarios y revisiones de parte de una amplia comunidad de expertos en diversos campos y por funcionarios de distintos gobiernos. Es importante considerar que,

¹ Para una versión más extensa sobre el SRES, ver Estrada 2009.

² <http://www.ipcc.ch/meetings/session28/doc8.pdf>

dado que las emisiones futuras de GEI son producto de sistemas dinámicos complejos determinados por factores tales como el desarrollo demográfico, el desarrollo socioeconómico y el cambio tecnológico, resultó necesario elaborar primero escenarios globales y regionales de este tipo de factores determinantes para poder generar escenarios de emisiones consistentes.

A grandes rasgos, la creación de los escenarios incluidos en el SRES pasó por seis etapas: a) revisión exhaustiva de la literatura disponible, b) análisis de las fuerzas determinantes, sus características e interacciones, c) desarrollo de líneas evolutivas o historias de desarrollo (cualitativas), d) cuantificación de estas historias de desarrollo mediante diferentes modelos integrados, e) un proceso de revisión abierto y f) revisiones de los expertos del IPCC y de gobiernos. En este sentido, el SRES representa el esfuerzo más importante en cuanto a la modelación tanto de los factores determinantes como de las emisiones futuras en el contexto del cambio climático y de acuerdo con los requerimientos para su estudio (por ejemplo, horizontes de cien años).

Los escenarios del SRES no son simples extrapolaciones de datos observados o producto de modelos estadísticos de pronóstico³, sino que están basados en distintas líneas evolutivas económicas, demográficas, sociales, ambientales, de cambio tecnológico, de demanda y oferta de energía, y de cambio de uso de suelo. Proponer, por ejemplo, tasas de crecimiento del producto interno bruto constantes (o estacionarias) para horizontes de tiempo tan largos implicaría ciertas suposiciones en variables como cambio tecnológico, productividad, oferta y demanda de energía, así como en las emisiones asociadas, que pudieran no ser consistentes con ninguna teoría de desarrollo. Por otra parte, la posibilidad de ocurrencia de los escenarios no debe basarse únicamente en la extrapolación de tendencias económicas, sociales y tecnológicas actuales.

El equipo del SRES se encargó de crear un rango de posibles evoluciones tanto de las variables determinantes como de las correspondientes emisiones de GEI para el siglo XXI, que fuera representativo del estado del conocimiento en el tema y de la incertidumbre conocida. Esta tarea —que equivaldría a haber tratado de

proyectar a finales del siglo XIX la evolución del mundo durante el siglo XX— claramente va más allá de lo que las herramientas de pronóstico pueden ofrecer y por lo tanto requiere el uso de otras herramientas adecuadas para tal propósito. De esta forma, el equipo de expertos decidió utilizar los escenarios como herramienta principal, basándose en historias de desarrollo autoconsistentes sobre posibles evoluciones a niveles global y regional de la economía, demografía, cambio tecnológico, comercio, política y ambiente, entre otras.

De esta manera, los escenarios permiten incluir cambios estructurales, como los ocurridos en el siglo XX, que en el presente puedan ser previsibles o imaginables y consistentes con una historia de desarrollo particular. Evidentemente la ocurrencia de un escenario en particular es muy incierta, pero a lo largo de la historia se ha mostrado la gran utilidad de esta herramienta para asistir a la toma de decisiones. El uso de escenarios para la toma de decisiones bajo incertidumbre tiene una larga historia, y posiblemente uno de sus primeros usos haya sido la planeación de operaciones militares mediante los llamados “juegos de guerra”. El uso de escenarios por empresas (particularmente en el sector energía) con motivos comerciales se ha extendido con fuerza en las últimas décadas; destaca, por ejemplo, el uso que el grupo Shell hizo de estas herramientas durante la crisis petrolera para planear estrategias corporativas de respuesta (Jefferson, 1983; Schwartz, 1991). El uso de escenarios para la evaluación de problemas ambientales futuros se ha convertido en una herramienta de uso común y ha sido utilizada por organizaciones como el World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), el International Institute of Applied Systems Analysis (IIASA), el World Energy Council, la International Energy Agency (IEA) y el IPCC, entre muchas otras.

Los escenarios son, entonces, una herramienta adecuada para el análisis de cambio climático en tanto la predicción de las emisiones futuras y de sus determinantes resulta imposible. Dicha herramienta permite la creación de imágenes alternativas sobre lo que podría ocurrir en el futuro y explorar la incertidumbre producida por diversos factores. Los escenarios en el SRES, tanto de emisiones como de las variables antes mencionadas, abarcan gran parte del rango de incertidumbre considerada en publicaciones especializadas, excluyendo únicamente los escenarios de tipo “sorpresa” o “desastre”.

³ Los modelos estadísticos de pronóstico tendrán un mejor desempeño que los escenarios para periodos de corto plazo (menos de una década), pero al no estar basados en una historia de desarrollo que incluya cambios estructurales en variables determinantes (que sin duda se espera que ocurran en periodos largos), es claro que no serían adecuados para proyecciones de largo plazo.

Debido a que estos escenarios fueron contruidos para representar líneas base para los estudios de impactos, vulnerabilidad, adaptación y mitigación, no consideran la ocurrencia de impactos de cambio climático ni las políticas para enfrentarlo. Es decir, las líneas de desarrollo describen *un mundo sin cambio climático*, por lo que no se asume la implementación de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático, la entrada en vigor de ningún acuerdo internacional para la reducción de emisiones, o medidas de mitigación o adaptación para enfrentar este fenómeno. Sin embargo, sí incluyen medidas que reducen emisiones de GEI producto de políticas dirigidas a cambios en los factores determinantes (población, economía, entre otras) y a otras políticas como mejoras en la calidad del aire y eficiencia energética, así como reducciones debidas al cambio tecnológico.

El cambio tecnológico se incluye explícitamente en cada historia de desarrollo y se considera al menos tan importante como el crecimiento económico y demográfico. En general los escenarios del SRES asumen futuros más prósperos que el presente (para el 2100, el producto interno mundial se incrementa entre 10 y 26 veces el actual) y en los que las diferencias en ingresos entre las distintas regiones disminuyen.

Los escenarios socioeconómicos para el Distrito Federal que se utilizarán en este proyecto están basados en los escenarios socioeconómicos con resolución espacial de 0.5° x 0.5° desarrollados por IIASA, uno de los principales grupos de modelación del SRES (IPCC, 2001). Los escenarios de IIASA retoman las mismas características cualitativas de las líneas evolutivas originales (A2, B1 y B2⁴; IPCC, 2001) y escenarios *t*, e introducen ajustes para mejorarlos. Los ajustes son menores en el caso de los escenarios B1 y B2; sin embargo, para el A2 se hizo un ajuste considerable a la baja en el crecimiento de la población mundial. Estos ajustes dieron lugar al escenario A2 revisado (A2r); la Tabla 1 muestra algunas de las características principales de estos escenarios. Cabe señalarse que en esta etapa del proyecto se generaron únicamente escenarios socioeconómicos para el escenario de emisiones A2r.

TABLA 1. Características principales de las familias de emisiones incluidas en el SRES

Taxonomía de los tres escenarios usados en el ejercicio de <i>downscaling</i> .			
	A2r	B2	B1
<i>Población</i> • Tamaño • Transición demográfica • Tasa de fertilidad largo plazo	Grande Atrasada y lenta Cercana o menor a la de reemplazo	Mediana Media Converge con la de reemplazo	Pequeña Rápida Muy por debajo de la de reemplazo
<i>Urbanización</i> • Tasa • Crecimiento de megaciudades • Gradiente urbano-rural	Alta Alto Medio-alto	Media Localizado (Asia) Medio	Baja Bajo (restringido) Converge a cero
<i>Ingreso</i> • Crecimiento • Convergencia • Diferencias de precios locales/ internacionales (PPP)	Medio-bajo Muy baja (inicialmente divergente) Inicialmente persistente, lenta, convergen después del 2040	Medio Media-baja Convergencia mediana (ligada a la productividad del trabajo)	Alto Muy rápida Convergencia rápida

Los escenarios generados por IIASA fueron producidos mediante modelos de evaluación integrada que consideran el proceso de generación de emisiones como un todo: simulan escenarios de variables determinantes como la población y la economía a nivel global y regional, el cambio tecnológico y la penetración regional de las nuevas tecnologías, la matriz de energía correspondiente, las emisiones producidas, los cambios en las temperaturas global y regional, y finalmente los impactos potenciales en diversos sectores.

⁴ No se incluyó la familia A1 en el ejercicio de *downscaling* ya que los autores consideran que la combinación de alto crecimiento económico y bajo crecimiento poblacional arrojaría resultados muy similares a la familia B1.

Estos nuevos escenarios atacan uno de los principales problemas de los modelos integrados y de los escenarios que fueron obtenidos mediante ellos en el SRES. Si bien solamente los modelos integrados pueden producir respuestas consistentes a preguntas de investigación —como las que plantea el cambio climático en términos de impactos y costos—, la resolución espacial de estos modelos ha sido un problema para la aplicación de sus salidas cuando se trata de realizar evaluaciones a nivel nacional o a resoluciones más finas (Grübler *et al.*, 2007).

La burda resolución espacial de los modelos integrados (que comprenden amplias regiones o macrorregiones mundiales) no se había podido empatar con las necesidades de los métodos de apoyo a la toma de decisiones. Existe un gran acervo de métodos para la evaluación de impactos a nivel nacional y local —algunos de ellos espacialmente explícitos— en los que difícilmente se podía utilizar información tan agregada como la que se encuentra en los escenarios originales del SRES. Debido a esta carencia, los estudios suelen no ser consistentes en cuanto a las proyecciones de clima y los escenarios socioeconómicos, debido a que son creados de forma independiente y sin considerar las líneas evolutivas asociadas a los cambios en temperatura. Lo mismo ocurre cuando se realizan proyecciones de variables socioeconómicas (como población y producto interno bruto) de manera independiente, en tanto no se hace ninguna consideración sobre su consistencia con la teoría económica (por ejemplo, implicaciones sobre la productividad). Aún en el caso de países pequeños o regiones pequeñas, las proyecciones económicas y demográficas (por no mencionar las de demanda y oferta de energía, así como opciones y costos de mitigación) que no consideren la línea evolutiva utilizada para generar los escenarios de clima, pueden resultar imposibles dentro del contexto del desarrollo global.

Los escenarios propuestos por IIASA (Grübler *et al.*, 2007) alcanzan una resolución de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ a nivel mundial y son consistentes con los escenarios del SRES que se utilizan para la generación de escenarios de cambio climático. El *downscaling* de estos escenarios no es simplemente mediante interpolación, ni producto de modelos estadísticos que asumen parámetros constantes en el tiempo; por otra parte, la metodología y los algoritmos fueron ajustados para cada familia de escenarios a fin de reflejar las características de cada línea evolutiva original del SRES, como convergencia o divergencia en los patrones demográficos y económicos).

Una de las características más importantes de la metodología utilizada por IIASA es la consistencia y la plausibilidad en cuanto a no violar las restricciones físicas, como es el caso de no llegar a proyecciones de densidad de población mucho mayores que las existentes en las ciudades más densamente pobladas como Hong Kong o Singapur. Para este fin, se utilizaron técnicas de descomposición para las proyecciones de población y de optimización para el PIB, de manera que se asegurara la consistencia con los resultados agregados de los escenarios SRES originales.

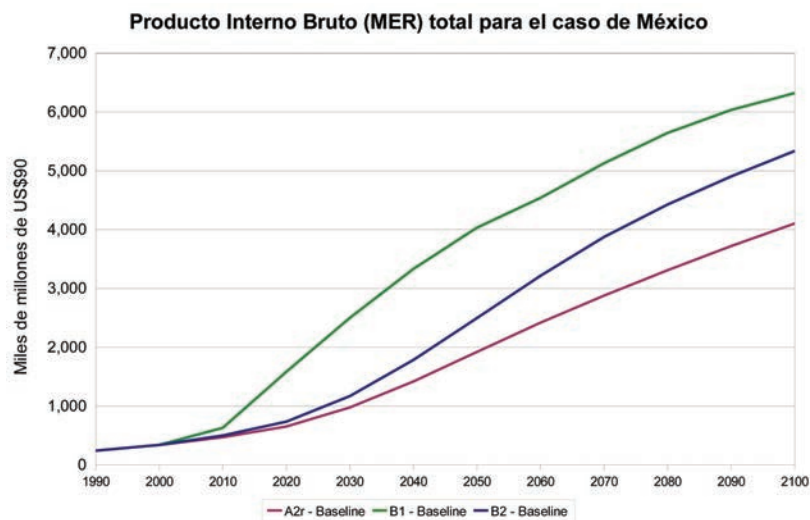
La metodología utilizada no se basa en la aplicación de tasas de crecimiento regionalmente uniformes, que ha demostrado ser problemática. Esta metodología considera, entre otras cosas, no sólo la heterogeneidad de los países debida a sus distintas etapas de desarrollo y estructura, sino las persistentes disparidades en sus potenciales de productividad y para el crecimiento económico. Finalmente, la metodología del IIASA considera explícitamente el cambio estructural.

En el caso de los escenarios económicos, los escenarios para el año base fueron comparados exitosamente con la base G-ECON 1.0 de William Nordhaus, reconocida como la mejor base mundial espacialmente explícita de PIB. Una descripción completa de la metodología de *downscaling* puede encontrarse en Grübler *et al.* (2007) y en el número especial correspondiente de la revista *Technological Forecasting and Social Change*, dedicado a los resultados del trabajo de *downscaling*.

De esta forma, una de las principales ventajas de utilizar estos escenarios es que son proyecciones consistentes de población, economía, tecnología, emisiones y clima a nivel global, regional, país y celda de la malla. Este recurso resulta de gran valor para el proyecto, ya que además recoge el esfuerzo más grande de modelación socioeconómica en cambio climático y hace disponible la información necesaria para realizar estudios a nivel nacional y subnacional.

La Figura 1 presenta una muestra de la información que se puede obtener de las bases de datos de los escenarios de alta resolución producidos por el IIASA.

PRODUCTO INTERNO BRUTO



POBLACIÓN TOTAL Y DENSIDAD DE POBLACIÓN

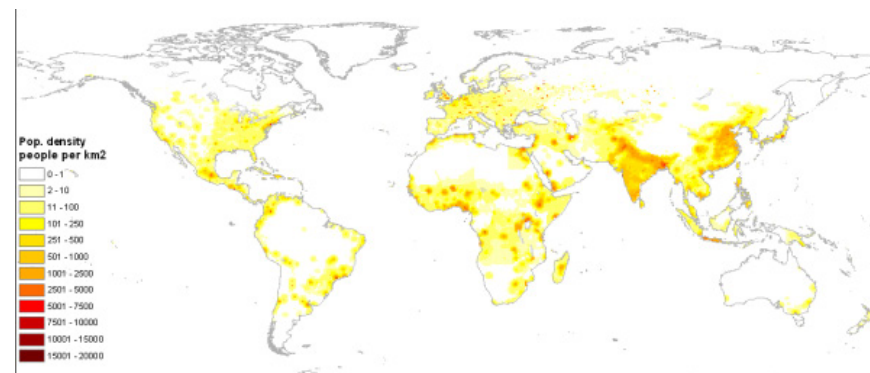
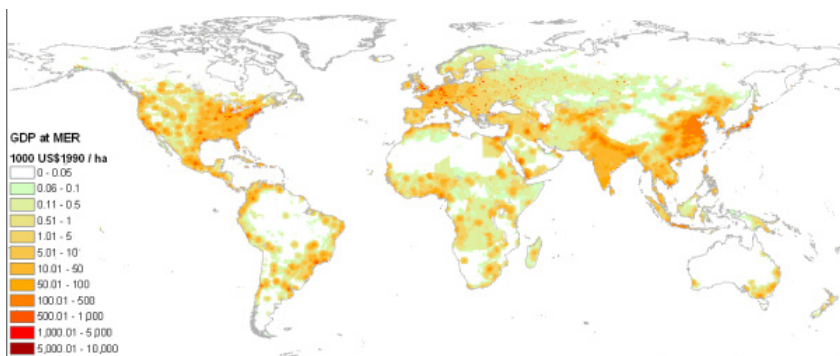
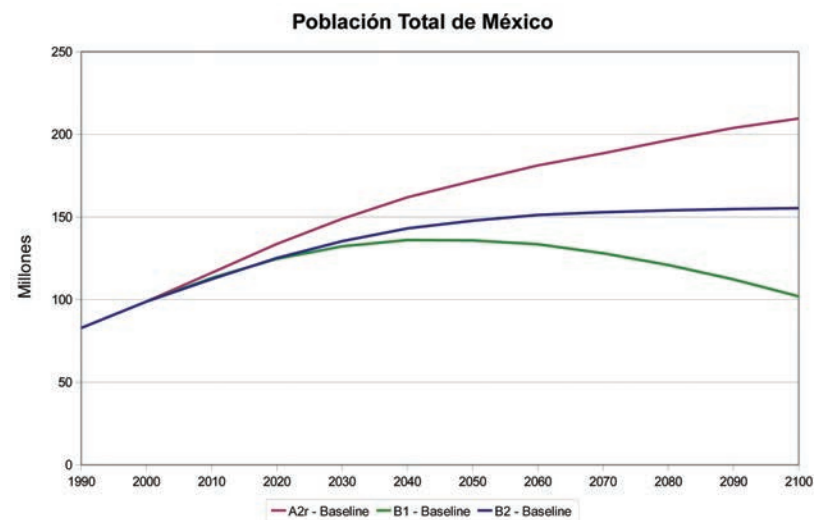


FIGURA 1. Ejemplos de variables socioeconómicas y su resolución espacial disponible.
Fuente: IIASA GGI Scenario Database

De esta forma, los escenarios con escala de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ de IIASA⁵ constituyeron un primer paso para generar las bases de datos necesarias para valorar los costos económicos potenciales del cambio climático en el Distrito Federal. Sin embargo,

la valuación de dichos costos requiere la generación de escenarios socioeconómicos a una resolución espacial considerablemente más fina, que permita tener estimaciones al nivel de delegación política. En la siguiente sección se muestra la metodología empleada para producirlos.

⁵ Los escenarios originales pueden obtenerse en <http://www.iiasa.ac.at>; una versión trabajada para México se encuentra en <http://uniatmos.atmosfera.unam.mx/ACDM/>

Escenarios de población para el Distrito Federal y las dieciséis delegaciones políticas

La Figura 2 muestra las proyecciones de población al 2100 para la parte central de México, de acuerdo con el escenario de emisiones A2r producido por IIASA. Como puede observarse, el Distrito Federal se encuentra, casi en su totalidad, dentro de una misma celda de la malla.

Los escenarios de población para el Distrito Federal se realizaron aplicando las tasas de crecimiento mostradas en dicha celda a la población inicial obtenida del Censo de Población y Vivienda del 2005, realizado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Los escenarios de población producidos por IIASA están disponibles en intervalos de diez años, por lo que las tasas de crecimiento correspondientes a estos escenarios fueron interpoladas linealmente para obtener datos de población anuales para el Distrito Federal.

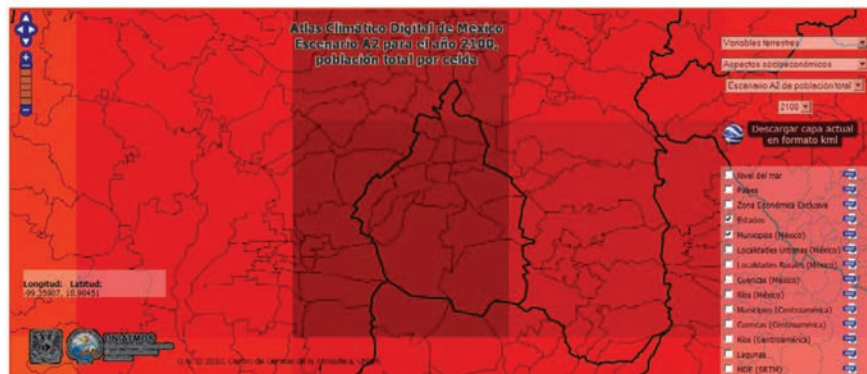


FIGURA 2. Escenarios de población para el 2100 de acuerdo con el escenario de emisiones A2r espacialmente explícito del IIASA. Resolución espacial: 0.5° x 0.5°. Fuente: Atlas Climático Digital de México, UNIATMOS

El panel A de la Figura 3 muestra la evolución de la población de la entidad de acuerdo con las tasas de crecimiento del escenario A2r. Para el 2100, la población es 1.18 veces la observada en el año 2005 (es decir, se presenta un crecimiento neto de 18%), lo que implica un crecimiento anual promedio de 0.18%. Como se puede observar en el panel B de dicha figura, la tasa de crecimiento es mayor durante las primeras dos décadas del siglo, llegando hasta 0.27%, para después reducir gradualmente hasta alcanzar alrededor de 0.1% al final del periodo. Como

se mencionó anteriormente, el A2r representa un escenario con crecimiento de población grande y una transición demográfica lenta, por lo que diferirá en estos sentidos de otras proyecciones elaboradas bajo supuestos de estabilización o reducción de la población total.

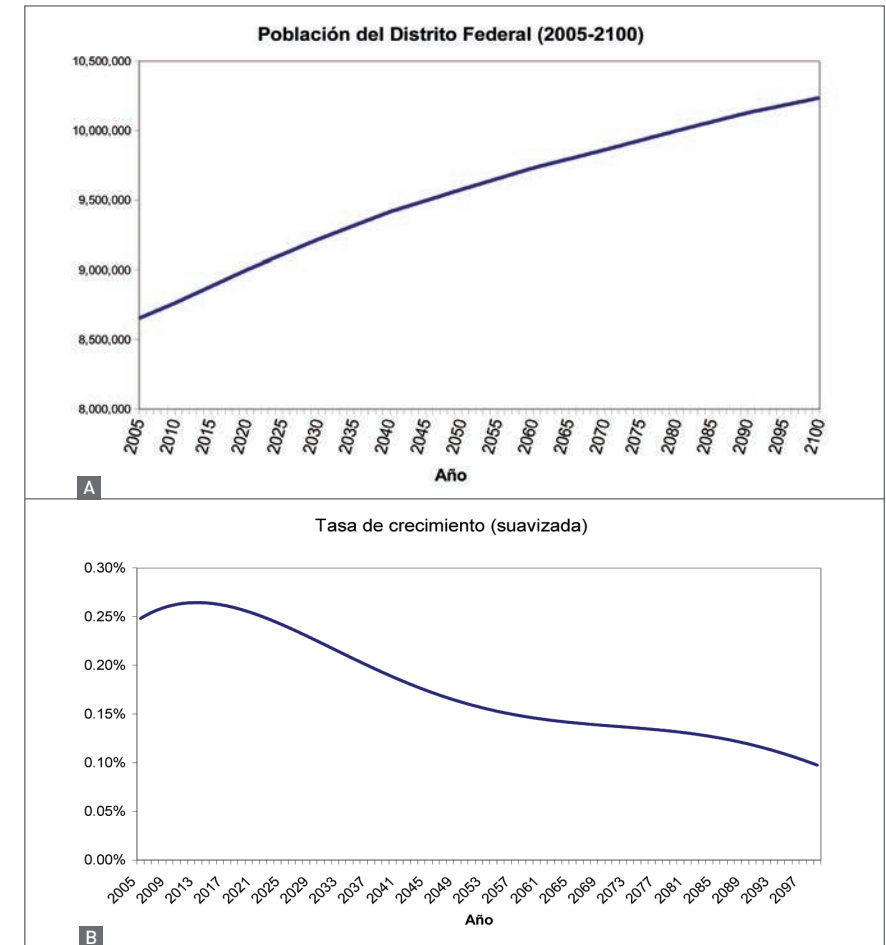


FIGURA 3. Escenario de población para el Distrito Federal durante el periodo 2005-2100, de acuerdo con el escenario de emisiones A2r. El panel A muestra la evolución del número de habitantes en la entidad, mientras que el panel B muestra las tasas de crecimiento asociadas

Para la generación de los escenarios poblacionales al nivel de delegación política, se utilizaron los patrones de crecimiento por delegación que se pueden obtener de las proyecciones elaboradas por CONAPO (Figura 4). Para el periodo 2005-2030, estos patrones fueron escalados para que se conserve el total de la población del Distrito Federal de acuerdo con el escenario A2r. Es decir, se ajustó el número de personas por delegación para que sumara el total de población del Distrito Federal bajo el escenario A2r, pero conservando la desagregación por delegación propuesta en las proyecciones de CONAPO.

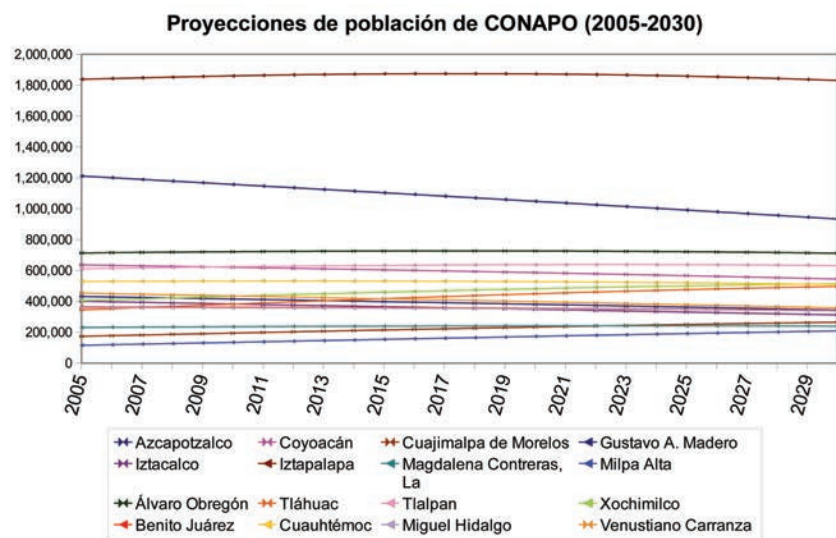


FIGURA 4. Proyecciones de población de CONAPO para las dieciséis delegaciones políticas del Distrito Federal en el periodo 2005-2100

Para extender los escenarios hasta el 2100, se utilizó una función logística del tipo

$$P_t = \frac{K P_0 e^{rt}}{K + P_0 (e^{rt} - 1)}$$

donde P_t es la población en el tiempo t , K se define como la capacidad de carga (nivel de población que puede soportar un ambiente dado sin sufrir un impacto negativo significativo) que en este caso representa el número de habitantes al que cada delegación convergiría en el largo plazo, y r es la tasa de crecimiento y determina cuán pronto se alcanzará el nivel de equilibrio K .

Los valores de los parámetros r y K se escogieron de manera que 1) los escenarios siguieran a grandes rasgos las trayectorias mostradas por las proyecciones de CONAPO, 2) la densidad de población (habitantes por km^2) por delegación se mantuviera en rangos similares a los observados en el Distrito Federal y que en ningún momento superara las densidades observadas en otras megaciudades y 3) las delegaciones con menor densidad de población observada absorbieran en mayor medida el crecimiento poblacional que las que actualmente tienen una mayor densidad.

La Figura 5 muestra los escenarios de población por delegación para el periodo 2005-2100 bajo el escenario de emisiones A2r. Como se observa, existen delegaciones que disminuyen su número de habitantes de forma importante (Iztacalco, Venustiano Carranza, Azcapotzalco y Gustavo A. Madero), otras con variaciones pequeñas (Benito Juárez, Iztapalapa, Miguel Hidalgo, Cuauhtémoc y La Magdalena Contreras), y otras más con aumentos sustanciales en la población (Milpa Alta, Cuajimalpa de Morelos, Tláhuac y Xochimilco).

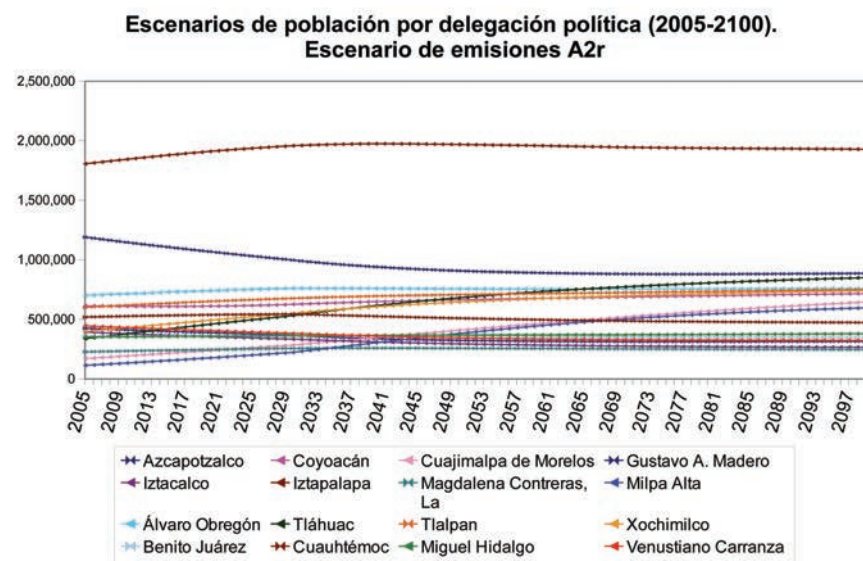


FIGURA 5. Escenarios de población por delegación política para el periodo 2005-2100 y el escenario de emisiones A2r

La Figura 6 muestra la evolución de la densidad de población correspondiente a cada una de las delegaciones de la entidad para el periodo 2005-2100. Como se mencionó anteriormente, los escenarios generados muestran un mayor aumento de la población en las delegaciones que en la actualidad tienen una menor densidad poblacional, ubicadas en el primer y segundo contornos de la ciudad central. De la misma forma, las delegaciones con mayor densidad poblacional, ubicadas en la ciudad central, tienden a mostrar disminuciones ligeras en algunos casos —aunque marcadas en otros— en esta variable, durante el presente siglo. Resalta que en ningún caso las densidades de población superan el rango observado y que, en general, la densidad poblacional de las delegaciones tiende a acercarse a valores en el rango de 8,000 a 10,000 habitantes por kilómetro cuadrado para finales de siglo.

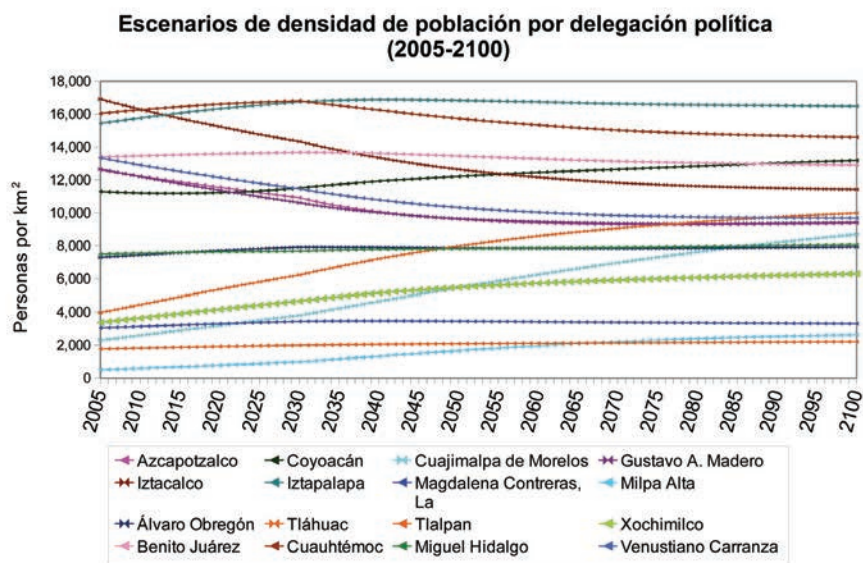


FIGURA 6. Escenarios de densidad de población por delegación política, bajo el escenario A2r para el periodo 2005-2100

De esta forma, los escenarios de población generados para el Distrito Federal siguen las tasas de crecimiento que el escenario A2r implica para la región (celda) correspondiente a la entidad, desagregan la población total en delegaciones de manera similar a como lo hacen los escenarios de CONAPO y muestran un cierto grado de convergencia respecto a la densidad de población en la entidad.

Escenarios de producto interno bruto para el Distrito Federal y para las dieciséis delegaciones políticas

Al igual que los escenarios de población mostrados en la sección anterior, los escenarios de producto interno bruto (PIB) para el Distrito Federal están basados en las tasas de crecimiento propuestas en los escenarios con resolución espacial de 0.5° x 0.5° producidos por IIASA; esto asegura la consistencia entre estas dos variables socioeconómicas. Como se mencionó anteriormente, todos los escenarios de emisiones del SRES del IPCC representan mundos con una economía más próspera que la actual; por ejemplo, el producto interno bruto mundial para el 2100 se incrementa entre 10 y 26 veces respecto al actual. Por otra parte, las diferencias de ingresos entre las distintas regiones disminuyen en esos escenarios económicos. Los escenarios que aquí se presentan comparten estas mismas características.

La disponibilidad y calidad de la información respecto al PIB delegacional en el Distrito Federal resultó bastante limitada y poco confiable. En un principio se utilizaron los datos disponibles en el Sistema de Información Económica, Geográfica y Estadística, provenientes del Censo Económico 2004 a nivel delegacional. Sin embargo, como se muestra en la Tabla 2, el PIB delegacional (aproximado por el valor agregado censal bruto, es decir, por la producción bruta total menos el consumo intermedio) lleva a estimaciones de PIB per cápita no creíbles. Por ejemplo, el PIB per cápita mensual en Milpa Alta resulta poco más de 200 pesos, el de Tláhuac alrededor de 650 pesos y el de Gustavo A. Madero e Iztapalapa en el orden de 1,300 pesos.

TABLA 2. Datos de producción del Distrito Federal a nivel delegacional disponibles en el Sistema de Información Económica, Geográfica y Estadística. Las tres primeras columnas están en miles de pesos y corresponden exactamente a los datos del sistema; las dos últimas columnas (marcadas con asterisco) están en pesos y fueron calculadas.

Delegación	PBT 2003	Consumo intermedio	Valor agregado censal bruto	PIB per cápita (anual)	PIB per cápita (mensual)
Álvaro Obregón	139,075,498	53,267,313	85,808,185	121,444	10,120
Azcapotzalco	75,781,423	44,774,978	31,006,445	72,905	6,075
Benito Juárez	139,297,923	63,053,626	76,244,297	214,762	17,897
Coyoacán	63,891,546	30,074,911	33,816,635	53,843	4,487
Cuajimalpa	28,437,375	15,595,666	12,841,709	73,962	6,164
Cuauhtémoc	416,745,289	125,745,500	290,999,789	558,168	46,514
Gustavo A. Madero	38,377,419	19,737,439	18,639,980	15,622	1,302
Iztacalco	48,121,746	24,126,530	23,995,216	60,744	5,062
Iztapalapa	61,832,060	31,589,154	30,242,906	16,609	1,384
Magdalena Contreras	17,353,194	9,152,177	8,201,017	35,824	2,985
Miguel Hidalgo	317,315,407	164,846,507	152,468,900	431,271	35,939
Milpa Alta	540,930	247,918	293,012	2,528	211
Tláhuac	4,698,462	1,984,027	2,714,435	7,888	657
Tlalpan	65,042,253	28,588,497	36,453,756	60,002	5,000
Venustiano Carranza	37,370,123	20,494,213	16,875,910	37,715	3,143
Xochimilco	16,371,413	8,075,822	8,295,591	20,510	1,709

De esta forma, se decidió aproximar el PIB delegacional utilizando las estimaciones de ingreso per cápita realizadas por CONAPO y el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo, que fueron desarrolladas para el cálculo del Índice de Desarrollo Humano 2005 y que después fueron adecuadas por el Centro de Estudios de las Finanzas Públicas de la H. Cámara de Diputados (ver Tabla 3). De aquí en adelante, todas las estimaciones de PIB y PIB per cápita serán en dólares de 2005 ajustados por poder de paridad de compra.

La Figura 7 muestra el crecimiento del PIB total del Distrito Federal durante el periodo 2006-2100. La tasa promedio anual de crecimiento es de 1.99% y lleva a una expansión del producto en el 2100 que equivale a 6.5 veces el PIB actual. Por su parte, bajo este escenario, el PIB per cápita promedio del Distrito Federal crecería con una tasa anual de 1.81%, y alcanzaría los 80,000 dólares a finales de siglo; esto representa un aumento de alrededor de 4.5 veces el PIB per cápita promedio en 2005.

TABLA 3. PIB per cápita por delegación de acuerdo con estimaciones de CONAPO y el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo, adecuadas por el Centro de Estudios de las Finanzas Públicas de la H. Cámara de Diputados

PIB per Cápita por Delegación (Dólares ajustados, 2005)	
Delegación	PIB per capita anual (dólares PPC)
Benito Juárez	27,824
Cuajimalpa de Morelos	25,407
Miguel Hidalgo	21,549
Coyoacán	19,724
Tlalpan	15,375
Cuauhtémoc	15,117
Azcapotzalco	15,096
Álvaro Obregón	13,651
Iztacalco	12,998
Gustavo A. Madero	12,920
Venustiano Carranza	12,773
La Magdalena Contreras	11,747
Xochimilco	11,158
Iztapalapa	10,481
Tláhuac	10,155
Milpa Alta	7,689
Distrito Federal*	15,229

*Promedio de las delegaciones que componen el Distrito Federal
Fuente: Elaborado por el Centro de Estudios de las Finanzas Públicas de la Cámara de Diputados, con datos del PNUD. Índice de Desarrollo Humano 2005.

Producto Interno Bruto (miles de millones) del Distrito Federal (2006-2100) bajo el escenario de emisiones A2r

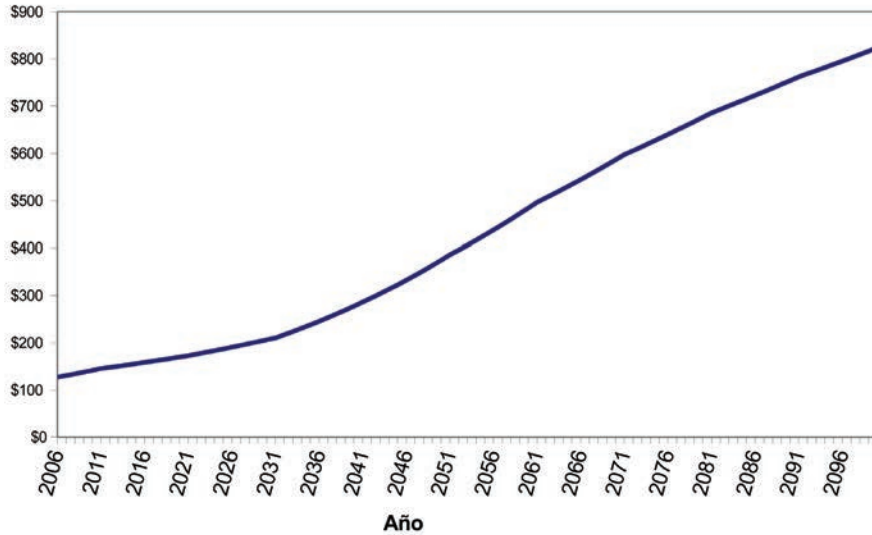


FIGURA 7. Producto Interno Bruto del Distrito Federal bajo el escenario de emisiones A2r, para el periodo 2006-2100

Para generar los escenarios de PIB a nivel de delegaciones políticas, se utilizó una metodología similar a la propuesta en Grübler *et al.*, 2007 para realizar los escenarios con resolución de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$. La metodología se describe brevemente a continuación.

Para generar las tasas de crecimiento del producto interno bruto para cada una de las dieciséis delegaciones del Distrito Federal se utilizó la ecuación propuesta en Grübler *et al.* (2007) que relaciona el crecimiento económico (GR) y el ingreso per cápita (GDPCAP) de la siguiente forma:

$$GR_t = \left(\frac{a \cdot (GDPCAP_t)}{(GDPCAP_t)^2 + b} + c \right)$$

donde t representa el tiempo y a , b y c son parámetros específicos para cada delegación que se estiman a partir de los datos observados. La evolución del PIB puede definirse al especificar 1) la tasa de crecimiento máxima para cada delegación (GR_{max}), 2) el ingreso per cápita en el que ocurre el máximo en la tasa de crecimiento

($GDPCAP_{max}$) y 3) la tasa de crecimiento de largo plazo a la cual convergirá la delegación. Los dos primeros quedan determinados por los parámetros a y b , mientras que el segundo lo determina c . Las expresiones para los parámetros a y b son:

$$a = 2 \cdot GDPCAP_{max} \cdot GR_{max}$$

$$b = (GDPCAP_{max})^2$$

De esta forma el PIB per cápita para la delegación n , en el tiempo t está dado por:

$$GDPCAP_{n,t} = \frac{GDP_{n,t}}{POP_{n,t}}$$

Mientras que el PIB para la delegación n en el tiempo t se calcula como:

$$GDP_{n,t} = GDP_{n,t-1} \cdot \left(\frac{GR_{n,t}}{100} + 1 \right)^{pl}$$

donde pl es la duración del periodo.

Finalmente, el PIB del Distrito Federal en el tiempo t se obtiene como la suma de los PIB de las dieciséis delegaciones en el tiempo t . Se realizó un proceso de optimización para minimizar el cuadrado de las diferencias totales, como función de a y b , entre el escenario original de PIB para el Distrito Federal y la suma de los correspondientes a las dieciséis delegaciones.

La Figura 8 muestra la evolución de las tasas de crecimiento del PIB durante el presente siglo. Es importante notar que las tasas de crecimiento del PIB siguen trayectorias que dependen del estado inicial de desarrollo de la economía de cada delegación y en los que se alcanza un máximo cuando las economías se industrializan. En el caso del Distrito Federal esto se traduce en que las tasas máximas de crecimiento por delegación se alcanzan en diferentes décadas; en todos los escenarios, Milpa Alta es la que más tarda en llegar a dicha etapa y la que alcanza una tasa de crecimiento máxima superior a la de cualquier otra delegación, dado su bajo nivel de desarrollo actual.

En contraste, las delegaciones con mayor desarrollo en la actualidad muestran tasas de crecimiento mucho más pequeñas y las tasas máximas de crecimiento ya fueron alcanzadas antes del periodo analizado o en los primeros años del mismo; es decir, ya alcanzaron un cierto nivel de desarrollo económico.

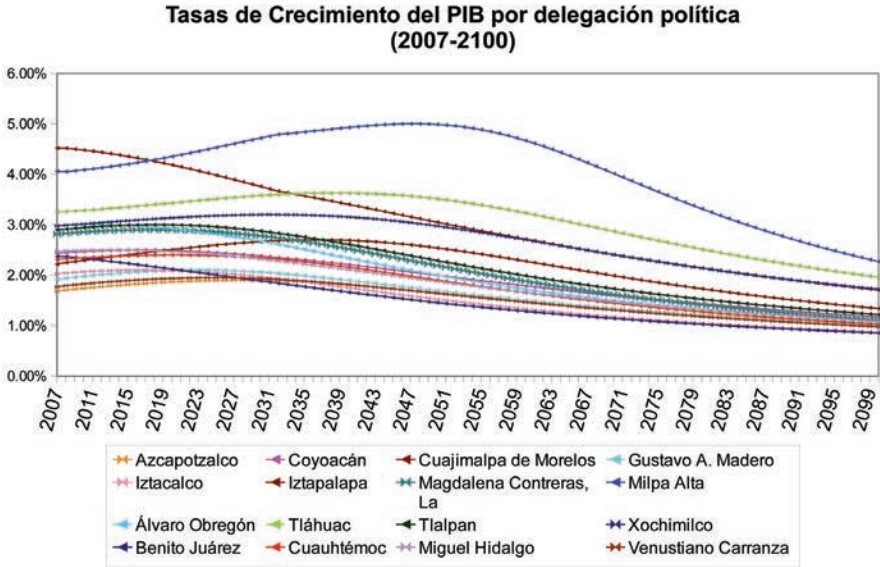


FIGURA 8. Tasas de crecimiento del PIB por delegación política del Distrito Federal, de acuerdo con el escenario de emisiones A2r

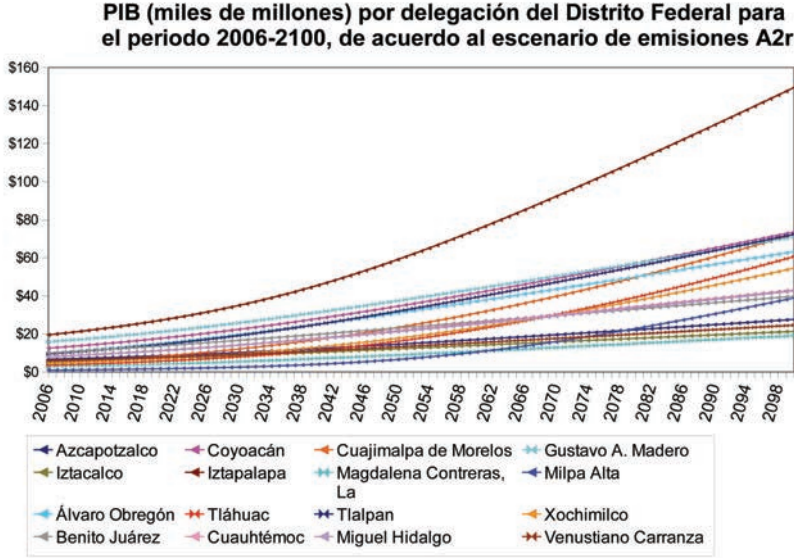


FIGURA 9. Escenarios de PIB por delegación del Distrito Federal para el periodo 2006-2100, de acuerdo con el escenario de emisiones A2r

Las figuras 9 y 10 muestran la evolución del PIB y del PIB per cápita, respectivamente, para cada una de las delegaciones del Distrito Federal, de acuerdo con las tasas de crecimiento obtenidas anteriormente.

Las tasas de crecimiento anual promedio del PIB por delegación se encuentran en el rango de 1.47% (Benito Juárez) a 4.04% (Milpa Alta). Las diferencias entre tasas, además de lo mencionado en los párrafos anteriores, se deben a que se asume una mayor equidad y convergencia en el ingreso per cápita entre las delegaciones del Distrito Federal. Esto se puede observar en la Figura 10, en la que se aprecia que, si bien el orden en cuanto a niveles de ingreso per cápita se mantiene, las diferencias relativas se reducen.

Esto último resulta más claro en la Figura 11: se muestran las diferencias porcentuales entre el PIB per cápita promedio del Distrito Federal y el correspondiente a cada delegación. En el año 2006, las diferencias en el PIB per cápita entre las delegaciones

son enormes. Por ejemplo, mientras que la delegación Benito Juárez tiene un ingreso per cápita 80% superior al promedio de la entidad, el ingreso per cápita de la delegación Milpa Alta representa únicamente la mitad de dicho promedio.

En contraste, para el 2100 el escenario de crecimiento del PIB propuesto reduce de manera significativa estas diferencias; el ingreso per cápita más elevado es solamente 32% mayor que el promedio de la entidad, mientras que el más pequeño es 26% menor.

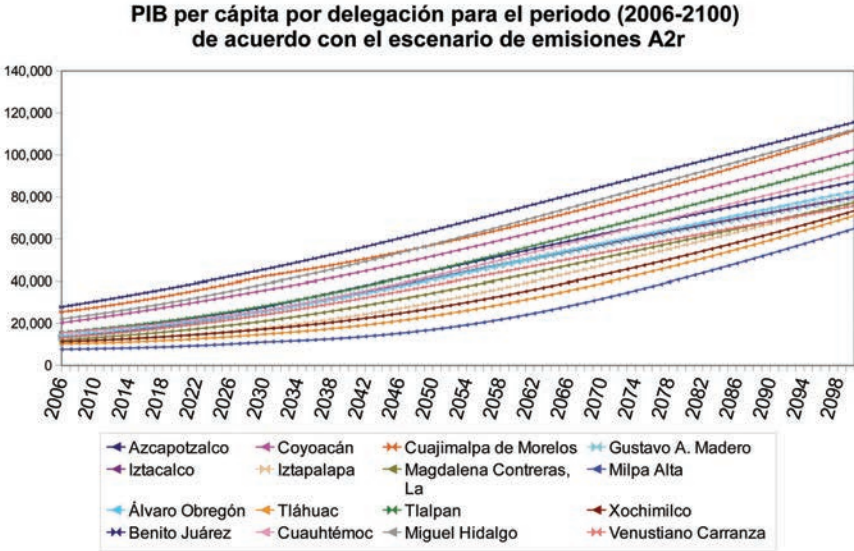


FIGURA 10. Escenarios de PIB per cápita por delegación del Distrito Federal para el periodo 2006-2100, de acuerdo con el escenario de emisiones A2r

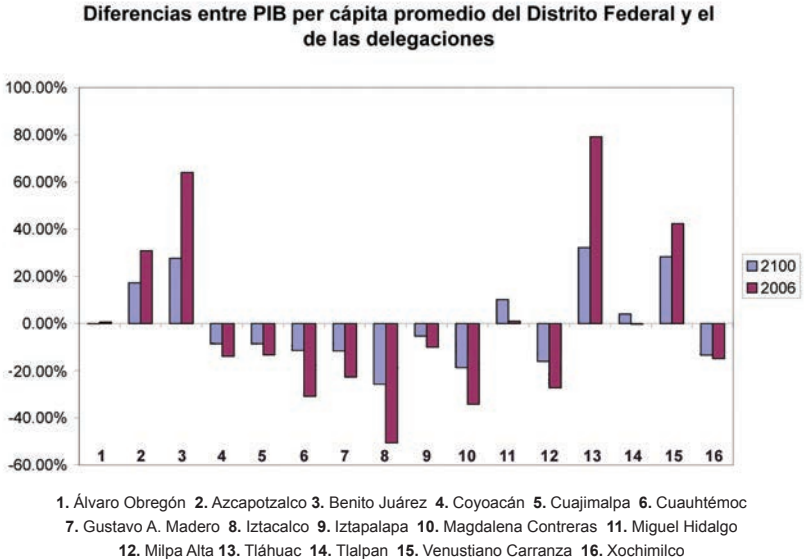


FIGURA 11. Diferencias observadas y proyectadas de ingreso per cápita por delegación respecto al ingreso per cápita promedio del Distrito Federal en el 2006 y 2100, de acuerdo con el escenario de emisiones A2r

Modelo estocástico para la evaluación de los impactos potenciales del cambio climático en la Ciudad de México

Se puede considerar el modelo estocástico que se desarrolla en este proyecto como un módulo del Modelo Estocástico de Evaluación Integrada del CCA (M-CCA/UNAM; Estrada *et al.*, 2010), que se puede clasificar dentro de los modelos de evaluación integrada (IAM, por sus siglas en inglés). Por esta razón, a continuación se presenta una breve descripción de dichos modelos, así como de sus fortalezas y debilidades.

Los IAM son modelos matemáticos cuyo objetivo es representar interacciones complejas entre escalas temporales y espaciales, procesos y actividades (IPCC, 2007)⁶. Estos modelos consideran los factores socioeconómicos, demográficos, tecnológicos y de producción y consumo que determinan los niveles de emisiones de GEI; junto con los ciclos biogeoquímicos y la química atmosférica, determinarán las concentraciones atmosféricas de dichos gases, el forzamiento radiativo y sus implicaciones para el clima global y regional, así como los impactos en los sistemas biofísicos y en la economía mundial y regional (Parson y Fisher-Vander, 1995; Hope, 2006). Algunos de los IAM que se han utilizado con mayor frecuencia en la literatura son DICE/RICE 99, FUND 2.9, PAGE2002 y MERGE. Estos modelos fueron revisados por el Tyndall Centre como parte de los estudios previos para la realización del Informe Stern. El que finalmente se escogió para realizar las evaluaciones presentadas en el reporte fue PAGE2002.

Es importante tomar en cuenta el objeto para el que fueron realizados estos modelos y sus limitaciones. Parson y Fisher-Vander (1995) recomiendan tener en cuenta que hasta el IAM más ambicioso está basado en submodelos con grandes simplificaciones de los sistemas naturales y sociales. Por lo tanto, se deben tener presentes las siguientes limitaciones:

- Los sistemas modelados son grandes, complejos y caóticos.
- La complejidad de los sistemas sociales y naturales no puede ser capturada en su totalidad por los IAM.
- El conocimiento científico es incompleto o inexistente en muchas áreas.
- El valor de la vida humana y de existencia de animales y plantas, así como la salud y diversidad, difícilmente se puede cuantificar, aunque en general es incluido, al menos parcialmente, en los IAM.

Los IAM son una herramienta para apoyar la toma de decisiones en cuanto a los impactos del cambio climático a nivel regional y global; consideran distintos sectores (con y sin mercado), políticas de reducción de emisiones y su costo/efectividad y costo/beneficio, el costo social del carbón, así como posibles políticas de adaptación en algunos casos. Los IAM no son modelos predictivos, sino que crean escenarios posibles de lo que podría ocurrir bajo condiciones de cambio climático; proveen información que difícilmente se podría construir con otras herramientas de análisis (Parson y Fisher-Vander, 1995). Estos modelos ofrecen una manera relativamente sencilla de abordar el problema multidimensional que representa el cambio climático, generando escenarios posibles que asistan a la toma de decisiones y a la evaluación de impactos y políticas.

A pesar de que en un inicio el nivel de detalle y resolución en este tipo de modelos era necesariamente burdo, a últimas fechas, dado el aumento en la capacidad de cómputo y la disponibilidad de más información, la nueva generación de estos modelos se enfoca en producir estimaciones a nivel de país, subregiones dentro del mismo y aún a resoluciones más finas.

El M-CCA/UNAM (Estrada *et al.*, 2010) incluye las funciones de impacto modificadas del modelo PAGE2002, y presenta un nuevo enfoque para generar escenarios probabilísticos de cambio climático que le permiten tener una resolución espacial mayor que cualquier otro IAM disponible actualmente (2.5° x 2.5°). De esta forma, el modelo es capaz de aprovechar los avances en la resolución espacial de los escenarios

⁶ Aunque por modelo integrado se entiende todo aquel modelo que involucra variables físicas y socioeconómicas, entre otras, con el fin de explicar, simular y generar información para una subsecuente toma de decisiones, en este trabajo nos referiremos a los modelos que abarcan los factores que se muestran en el esquema de IAM en Hope (2006).

socioeconómicos presentados en, por ejemplo, Grüber *et al.* (2007). Al igual que el modelo PAGE2002, el M-CCA/UNAM estima los impactos correspondientes dos grandes grupos que abarcan los impactos en sectores con y sin mercado. Mediante el uso de funciones de impactos con un nivel de agregación muy grande, calibradas con la información disponible en la literatura, se pretende capturar los efectos de interacción de forma implícita, en lugar de tratar de modelarlos directamente.

La Figura 12 muestra un ejemplo de una corrida del modelo de evaluación integrada global desarrollado por Estrada *et al.* (2009), que utiliza una metodología similar a la propuesta para este proyecto. Los mapas muestran estimaciones para el año 2100 bajo el escenario de emisiones A2, consideran la regionalización de veinte modelos de circulación general y tienen una resolución espacial de $2.5^\circ \times 2.5^\circ$. El panel superior izquierdo muestra el cambio medio en las temperaturas regionales, mientras que el derecho muestra el cambio en las temperaturas regionales, considerando la cola superior de la distribución simulada para cada punto de malla. En el panel medio a la izquierda se muestra la probabilidad de rebasar un umbral de 4°C para cada punto de malla en el 2100 y, como se puede apreciar en dicho mapa, las probabilidades de este evento son considerablemente mayores sobre los continentes y particularmente en latitudes altas. En el panel medio a la derecha se muestran las estimaciones de los impactos promedio para México en el 2100 que representarían entre 4% y 12% del producto interno bruto en ese año, dependiendo de la región del país. En el panel inferior izquierdo se muestran los impactos potenciales para México en el 2100 considerando la cola superior de la distribución de los impactos para cada punto en la malla sobre el país. En este caso, las estimaciones representarían pérdidas de entre 15% y más de 35% dependiendo de la región del país. Finalmente, el panel inferior derecho muestra el impacto promedio para la región denominada OCDE.

La Figura 13 muestra distintas estimaciones del porcentaje de Producto Interno Bruto que se perdería para México a razón del cambio climático durante el periodo 2001-2100, bajo el escenario de emisiones A2. Como se observa, dichos impactos podrían alcanzar más de 20% del PIB para finales de siglo.

De acuerdo con estimaciones preliminares del M-CCA/UNAM, los impactos acumulados hasta el 2100 por cambio climático podrían representar entre veinte y cuarenta veces el PIB actual de México. Esta estimación equivaldría a perder más de 3% del PIB todos los años desde el 2001 hasta el 2100.

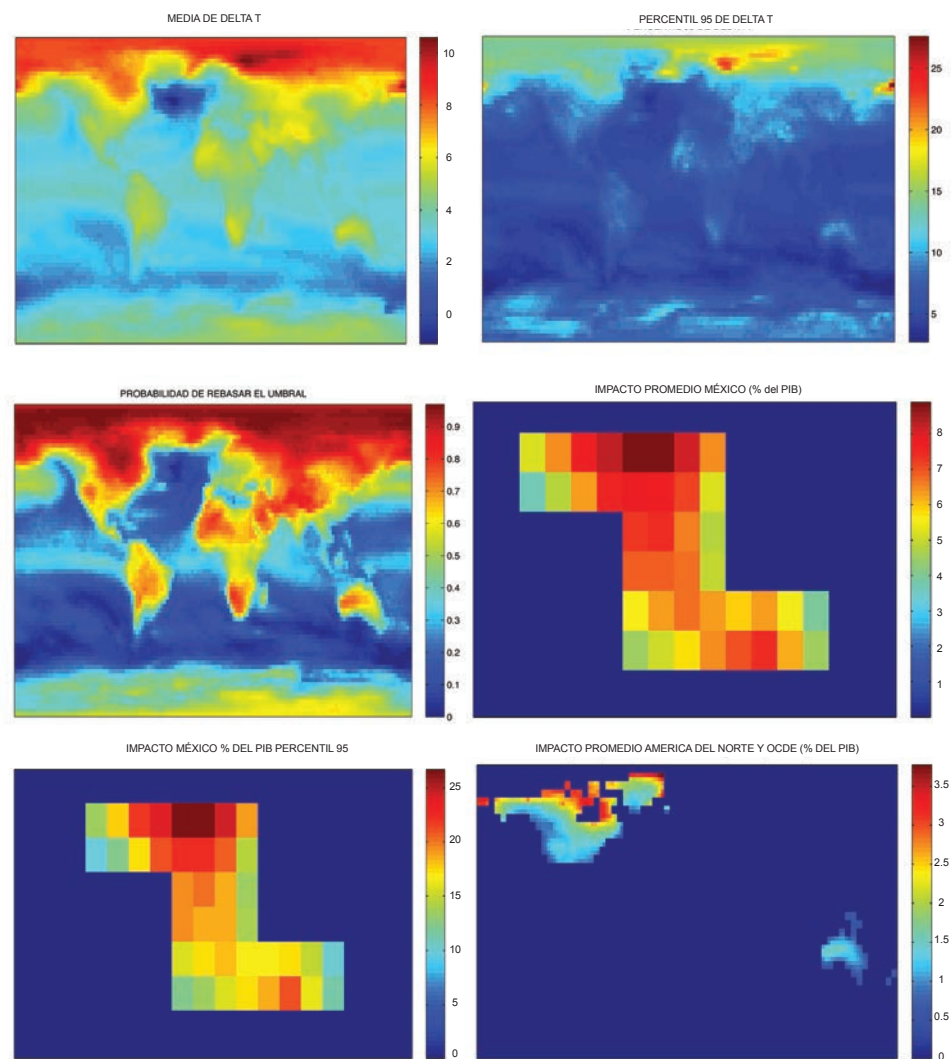


FIGURA 12. Ejemplo de algunas de las salidas del M-CCA/UNAM

Estimaciones de los costos del cambio climático para México 2001-2100 (Escenario A2). Modelo CCA/UNAM

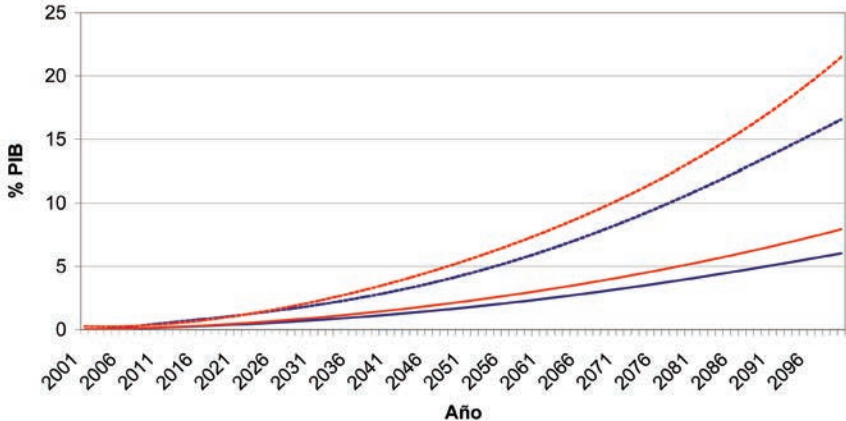


FIGURA 13. Estimaciones de los costos potenciales de cambio climático para México, bajo el escenario de emisiones A2. En azul sólido (punteado) se muestra la reducción promedio (percentil 95%) del PIB utilizando una actitud neutra hacia la incertidumbre. En rojo se muestra lo correspondiente pero utilizando una actitud precautoria hacia la incertidumbre.

Descripción técnica del modelo estocástico para la evaluación de los impactos potenciales del cambio climático en el Distrito Federal

Generación de escenarios probabilísticos de cambio climático

Una de las características del cambio climático es la incertidumbre de las diversas fuentes y tipos, de la que se deben distinguir dos tipos: aleatoria y epistémica. La primera se refiere los casos en los que las probabilidades se pueden establecer mediante la observación y repetición de experimentos aleatorios; la segunda se refiere a los casos en los que el resultado de un experimento es incierto porque existe conocimiento limitado, información incompleta o falta de comprensión. Es claro que la incertidumbre dominante en torno al cambio climático es epistémica y por lo tanto un enfoque frecuentista no sería capaz de proveer una estimación razonable de las probabilidades.

La incertidumbre epistémica resulta difícil de comunicar e integrar en los estudios de cambio climático ya que no puede ser expresada mediante una única distribución de probabilidades. La mayoría de las metodologías y herramientas que se utilizan comúnmente para modelar incertidumbre, valorar costos y apoyar la toma de decisiones no son adecuadas cuando este tipo de incertidumbre domina en un

problema. De acuerdo con Gay y Estrada (2010), resulta imposible conocer las “verdaderas” probabilidades que sean lo más consistentes con el estado del conocimiento y la información subjetiva o juicio de experto disponibles. En la creación de escenarios probabilísticos de cambio climático, las creencias subjetivas deben ponerse al frente, estar claramente planteadas y ser una expresión que tenga significado para el tomador de decisiones, en lugar de esconderse detrás de un artefacto estadístico que resulta inadecuado y cuyo resultado da un falso sentido de objetividad. De acuerdo con los autores, la información subjetiva tiene, y debe tener, un papel crucial en la estimación de probabilidades cuando la información es incompleta.

La modelación de la temperatura global en el M-CCA/UNAM para la estimación de los impactos potenciales de cambio climático se realiza mediante la metodología basada en el Principio de Máxima Entropía publicada por Gay y Estrada (2010) y Estrada *et al.* (2008). Esta metodología permite producir escenarios probabilísticos de cambio climático que integran la opinión de experto y la incertidumbre generada por la utilización de distintos modelos de clima y escenarios de emisiones. A continuación se presenta brevemente el Principio de Máxima Entropía y su aplicación para la generación de escenarios de cambio climático.

El Principio de Máxima Entropía

Jaynes (1957, 1962), partiendo de la medida de entropía de Shannon, propuso el Principio de Máxima Entropía como una manera de asignar distribuciones de probabilidad a partir de información incompleta. La metodología que aquí se presenta para asignar distribuciones de probabilidad a los escenarios de cambio climático es una aplicación del problema del dado de Jaynes (1962).

El formalismo del Principio de Máxima Entropía se presenta a continuación. Suponga que la cantidad x puede tomar los valores (x_1, x_2, \dots, x_n) donde n puede ser finito o infinito y se tiene información expresada en términos de valores promedio o de algún otro valor esperado $\{f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)\}$, donde $m < n$. El objetivo es determinar las probabilidades de cada valor posible de x que sean consistentes con la información dada. El problema se puede expresar de la siguiente forma:

$$\max_p H(X) = -K \sum_{i=1}^n p_i \log(p_i) \quad (1)$$

sujeto a

$$\sum_{i=1}^n p_i f_k(x_i) = y_k, \quad k = 1, 2, \dots, m \text{ (restricciones)} \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n p_i = 1 \text{ (condición de normalización) donde } p_i \geq 0 \quad (3)$$

Cabe notar que el problema está subdeterminado (Golan *et al.*, 1996). Las probabilidades que son consistentes con las restricciones (2) y (3) pueden recuperarse mediante la maximización de la función Lagrangiana.

$$L = -\sum_{i=1}^n p_i \ln(p_i) + \sum_{k=1}^m \lambda_k \left[y_k - \sum_{i=1}^n p_i f_k(x_i) \right] + \mu \left[1 - \sum_{i=1}^n p_i \right]$$

cuyas condiciones de primer orden son:

$$\frac{\partial L}{\partial p_i} = -\ln(p_i) - 1 - \sum_{k=1}^m \lambda_k f_k(x_i) - \mu = 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_k} = y_k - \sum_{i=1}^n p_i f_k(x_i) = 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial \mu} = 1 - \sum_{i=1}^n p_i = 0$$

La solución formal de este sistema de $n + m + 1$ ecuaciones y parámetros es

$$\hat{p}_i = \frac{1}{\Omega(\hat{\lambda}_1, \hat{\lambda}_2, \dots, \hat{\lambda}_m)} \exp \left[-\sum_{k=1}^m \hat{\lambda}_k f_k(x_i) \right]$$

donde

$$\Omega(\hat{\lambda}) = \sum_{i=1}^n \exp \left[-\sum_{k=1}^m \hat{\lambda}_k f_k(x_i) \right]$$

es un factor de normalización llamado la función de partición.

La distribución de máxima entropía no tiene una solución cerrada y por lo tanto se requieren técnicas de optimización numérica para calcular las probabilidades. La máxima entropía asigna probabilidades positivas a todo evento que no es excluido por la información inicial: ninguna posibilidad es ignorada.

Del número infinito de distribuciones de probabilidad que satisfacen las restricciones (1) y (2), la distribución de máxima entropía es lo menos sesgada posible: cualquier otra asignación de probabilidades implicaría hacer supuestos que la

información disponible no justifica. El Principio de Máxima Entropía permite razonar lo mejor posible sobre las probabilidades (que no su frecuencia relativa) de cada uno de los n posibles valores de x , y hacer las mejores predicciones consistentes con la información disponible. Esto no quiere decir que las predicciones sean correctas, sólo que para poder hacer mejores predicciones se necesitaría tener más información (Jaynes, 1957).

Escenarios probabilísticos de cambio climático

Como se mencionó anteriormente, es imposible conocer las “verdaderas” probabilidades de los diferentes escenarios y cambios en las variables climáticas. Por lo tanto el objetivo debe ser encontrar las probabilidades más consistentes con el estado del conocimiento y nuestro sistema de creencias. El Principio de Máxima Entropía permite encontrar dichas probabilidades combinando la información subjetiva del tomador de decisiones y la información que se puede obtener de los modelos físicos de clima.

Para obtener la distribución de máxima entropía se requieren dos elementos: 1) el rango de los posibles valores de los escenarios de cambio climático obtenidos a través de los distintos modelos de clima y escenarios de emisiones y 2) el valor promedio del cambio de la variable de interés. Una vez que el promedio del cambio es escogido, el resto del procedimiento es totalmente automático.

El Principio de Máxima Entropía es capaz de producir escenarios de cambio climático que conservan la mayor cantidad de incertidumbre posible respetando lo que no se conoce, sujeto a que la distribución sea consistente con la información subjetiva y el estado del conocimiento disponibles.

La distribución de máxima entropía se propone como la representación probabilística de las creencias del tomador de decisiones o experto sobre el cambio en la media de las variables climáticas en el futuro. Esta distribución maximiza la incertidumbre sujeta a los distintos tipos de información disponible: la información objetiva “científica” y la información subjetiva de expertos o creencias del tomador de decisiones. Medidas como la entropía relativa y el índice de información revelan cuánto depende la distribución de máxima entropía encontrada de la información subjetiva añadida por el tomador de decisiones.

El M-CCA/UNAM genera escenarios probabilísticos basados en esta metodología para los escenarios de emisiones A1FI, A2, B1 y B2 incluidos en el SRES y para los escenarios de estabilización a 550 y 450 pmm (partes por millón). Adicionalmente, se pueden elegir escenarios de aumento grado por grado (de 1 a 6 °C) que representen alguna “meta” de estabilización. El modelo permite elegir tres tipos de actitud hacia la incertidumbre: neutro (distribución de probabilidades uniforme), precautorio (asigna mayores probabilidades a los incrementos de temperatura más grandes) y no precautorio (asigna mayores probabilidades a los incrementos de temperatura más pequeños).

Escenarios probabilísticos regionales de cambio climático

Para generar escenarios locales de cambio climático, el modelo utiliza una versión probabilística de patrones de escala regionales (Santer, 1990; Estrada *et al.*, 2009). El método de patrones de escala consiste en relacionar el cambio en la variable de clima X en el punto de malla i en el tiempo t , con la razón de la temperatura global en el tiempo t y la temperatura de equilibrio, multiplicada por el cambio al equilibrio de la variable X en el punto de malla i , es decir:

$$\Delta X_i(t) = \Delta X_{e,i} (\Delta T(t)/\Delta T_e)$$

Diversas evaluaciones han mostrado que este método arroja resultados competitivos en comparación con otros métodos más complejos (Mitchell, 2003).

El M-CCA/UNAM tiene los patrones de escala de los siguientes modelos de circulación general: BCCR-BCM2.0, CCSM3, CGCM3.1(T47), CNRM-CM3, CSIRO-Mk3.0, ECHAM5/MPI-OM, ECHO-G, FGOALS-g1.0, GFDL-CM2.0, GFDL-CM2.1, GISS-EH, GISS-ER, INM-CM3.0, IPSL-CM4, MIROC3.2(hires), MIROC3.2(medres), MRI-CGCM2.3.2, PCM, UKMO-HadCM3 y UKMO-HadGEM1.

El M-CCA/UNAM combina los patrones correspondientes a los modelos antes mencionados por medio de métodos de Monte Carlo, utilizando distribuciones de probabilidad sobre los patrones de escala. Para tal efecto, el modelo permite la elección de seis distribuciones de probabilidad sobre los patrones de escala: uniforme,

de acuerdo con su desempeño⁷ a nivel global, a nivel nacional, la utilización de distribuciones de probabilidad que sólo consideren los modelos con mejor desempeño a nivel global o nacional y la selección de modelos para México escogida en Conde *et al.* (2010).

Así, los escenarios probabilísticos de cambio climático generados por el M-CCA/UNAM consideran la incertidumbre tanto a nivel global, como la generada por la regionalización, así como la incertidumbre producida por el uso de distintos escenarios de emisiones.

Modelación del efecto de la isla de calor

Para modelar el efecto de la isla de calor sobre la temperatura local se recurrió a un método simple muy utilizado en la literatura (Oke, 1973; Jáuregui, 2001; Torok *et al.*, 2001; Martín-Vide, 2003; Tejeda y Luyando, 2010). Dicho método consiste en modelar el cambio en la temperatura local como el logaritmo en base 10 de la población mediante una ecuación del tipo:

$$\Delta 10 \log_{10}(POB) - b$$

donde los parámetros a y b se escogieron como se muestra en la Tabla 4. Para simular la isla de calor observada, se dividió la ciudad en tres partes de acuerdo con su nivel de urbanización y características de uso de suelo. Las delegaciones consideradas como parte de la ciudad central son Azcapotzalco, Gustavo A. Madero, Benito Juárez, Cuauhtémoc, Miguel Hidalgo y Venustiano Carranza. El primer contorno de la ciudad está compuesto por Coyoacán, Cuajimalpa de Morelos, Iztacalco e Iztapalapa. Las delegaciones incluidas en el segundo contorno son La Magdalena Contreras, Milpa Alta, Álvaro Obregón, Tláhuac y Tlalpan.

⁷ El desempeño aquí se entiende como la habilidad de un modelo de circulación general para reproducir las características de alguna variable de clima observado (ver Conde *et al.*, 2010).

TABLA 4. Valores de los parámetros *a* y *b* utilizados para el cambio en las temperaturas anuales a nivel delegación, producido el efecto de la isla de calor

Parámetros ciudad central	
<i>a</i>	0.65
<i>b</i>	2
Parámetros primer contorno	
<i>a</i>	0.5
<i>b</i>	2
Parámetros segundo contorno y zonas con áreas de conservación	
<i>a</i>	0.45
<i>b</i>	2

La Figura 14 muestra el incremento en las temperaturas delegacionales causado por el efecto de isla de calor, como función de los escenarios de población mostrados en las secciones anteriores. En comparación con el año 2005, para el 2100 las variaciones en temperatura por este fenómeno serán pequeñas en la mayoría de las delegaciones, que van desde ligeros enfriamientos en algunas hasta calentamientos en otras. Sin embargo, en delegaciones como Milpa Alta y Tláhuac, los incrementos oscilan entre 0.5 °C y 0.2 °C respectivamente.

Debido a que la temperatura de referencia para las funciones de impacto que se utilizan en el modelo es la preindustrial, los cambios en las temperaturas medias anuales causados por la isla de calor se suman a los valores que se obtienen de los escenarios de cambio climático para el cuadro de malla que corresponde al Distrito Federal. En este modelo las diferencias entre los cambios en las temperaturas delegacionales difieren únicamente por el efecto de la isla de calor.

Funciones de impacto del modelo estocástico para la evaluación de los impactos potenciales del cambio climático en el Distrito Federal

Las funciones de impacto utilizadas en este proyecto son muy similares a las propuestas por Hope (2006) y están incluidas en el modelo PAGE2002 para los sectores económico y no-económico. Las diferencias estriban en las parametrizaciones para adecuarlas a las dieciséis delegaciones del Distrito Federal. Es importante tomar en cuenta que para esta primera versión del modelo no se toman en cuenta los impactos potenciales generados por discontinuidades de gran escala en el clima, así que los impactos que aquí se presentan podrían estar subvaluados.

Las funciones de impacto pueden representarse como

$$WI_{t,d,r} = (\Delta T_{t,r} / 2.5)^{POW} WI_{d,r} GDP_{t,r} \tag{1}$$

donde $WI_{t,d,r}$ representa los impactos en la economía en el tiempo *t*, sector *d*, delegación *r*; $\Delta T_{t,r}$ es el incremento con respecto a la temperatura preindustrial causado tanto por el efecto de la isla de calor como por el cambio climático global; $WI_{d,r}$ son los multiplicadores regionales para ajustar el porcentaje de pérdida en el PIB en las distintas delegaciones y sectores respecto a la región de referencia (Unión Europea); POW es el exponente que determina la forma funcional de la función de impactos (lineal, cuadrática, cúbica, etc.) y está representado por una distribución triangular; $GDP_{t,r}$ representa el PIB en el tiempo *t* en la delegación *r*.

Las funciones de impacto (1) están parametrizadas mediante distribuciones de probabilidad triangulares descritas como se muestra en la Tabla 5. Los multiplicadores regionales $WI_{d,r}$, utilizados para ajustar el porcentaje de pérdida en el PIB en las distintas delegaciones y sectores respecto a la región de referencia, también están representados por distribuciones de probabilidad triangulares. Los valores escogidos son ciertamente subjetivos, pero están en función del nivel de desarrollo que muestra cada delegación de acuerdo con el índice de desarrollo humano (IDH; PNUD, 2005). De esta forma, el modelo asume que las delegaciones con

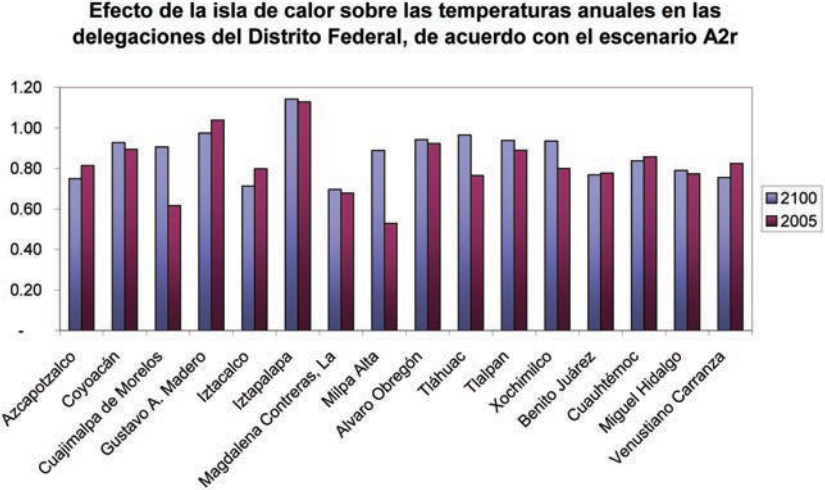


FIGURA 14. Efecto de la isla de calor sobre las temperaturas anuales en las delegaciones del Distrito Federal, de acuerdo con el escenario A2r

mayor desarrollo tendrán impactos menores por el incremento en la temperatura debido a que cuentan con mayores recursos e infraestructura que les permite afrontar de mejor manera el cambio climático.

Para este propósito, las delegaciones políticas del Distrito Federal se dividieron en cuatro grupos, de acuerdo con su valor de IDH. En el primer grupo se encuentran las delegaciones con un IDH mayor o igual a 0.9, que resulta comparable con países con nivel de desarrollo muy alto (Alemania, Noruega, Irlanda, EUA). En este grupo se encuentran las delegaciones Benito Juárez, Miguel Hidalgo y Coyoacán. En un segundo grupo se encuentran las delegaciones con valores de IDH entre 0.899 y 0.87, que representan un alto desarrollo y que son comparables con países como Chile, Polonia y Estonia. El tercer grupo engloba a delegaciones con un IDH entre 0.869 y 0.8, similar al mostrado por México, Rusia y Perú. Finalmente en el cuarto grupo se encuentra Milpa Alta, que es la delegación con menor IDH de la entidad, similar a países como República Dominicana, Armenia y China. La Tabla 5 muestra cómo fueron parametrizadas las funciones de impacto para cada uno de estos grupos.

Si el modelo no considerara explícitamente la incertidumbre — como ocurre en las estimaciones realizadas en *La Economía del Cambio Climático en México* (SHCP-SEMARNAT, 2009)—, las estimaciones que se realicen sobre el riesgo que una región o sector enfrentaría bajo condiciones de cambio climático serán necesariamente limitadas y potencialmente sesgadas, ya que están basadas en una sola realización de un proceso con componentes fundamentalmente estocásticos (Gay y Estrada, 2010). En este caso se está dejando de comunicar información potencialmente relevante al tomador de decisiones y se está cambiando incertidumbre por ignorancia (Schneider, 2003).

Adicionalmente, cuando se producen estimaciones probabilísticas, la información y medidas de riesgo que se pueden obtener son muy variadas y se pueden acoplar mejor a las necesidades de información para la toma de decisiones. La estimación de riesgo necesariamente involucra la estimación de probabilidades, por lo que no es factible bajo un enfoque determinístico.

Finalmente, el enfoque probabilístico es conveniente cuando se tiene información limitada sobre variables de entrada, parámetros y calibraciones, como ocurre

TABLA 5. Impactos económico y no-económico de referencia y multiplicadores para las delegaciones del Distrito Federal de acuerdo con el valor de su IDH y descripción de la distribución triangular utilizada para POW

	Parámetros de la distribución triangular			IDH
	Mín.	Moda	Máx.	
Impacto económico en la región de referencia (Unión Europea)	-0.1	0.6	1	--
Impacto no-económico en la región de referencia (Unión Europea)	0.0	0.7	1.5	--
Multiplicadores para delegaciones de "muy alto desarrollo"	1	1.2	2	> 0.9
Multiplicadores para delegaciones de "alto desarrollo"	1	1.3	2.5	Entre 0.899 y 0.870
Multiplicadores para delegaciones de "desarrollo medio"	1	1.5	3	Similar al IDH de México (entre 0.869 y 0.80)
Multiplicadores para delegaciones de "bajo desarrollo"	1	1.7	3	Menor que 0.8
POW	1	1.3	3	--

en el caso de las funciones de impacto para distintas regiones o sectores y en la representación de fenómenos complejos como los que integran los modelos de clima. Como menciona Hope (2006), utilizar un modelo determinístico y obtener resultados en términos de una "mejor estimación" puede ser peligrosamente engañoso. Por el contrario, se debe usar un rango de posibles resultados para orientar la toma de decisiones. Por estas razones, tanto el PAGE2002 como el M-CCA/UNAM están basados en un enfoque probabilístico en el que la mayoría de los parámetros del modelo están representados por distribuciones de probabilidad.

El modelo está programado en MATLAB (ver Figura 15) y tiene una interfaz amigable en la que el usuario tiene que elegir una serie de opciones para determinar 1) el número de simulaciones que realizará el modelo, 2) el escenario de emisiones de referencia, es decir, el escenario sin políticas para reducir los efectos del cambio climático, 3) el escenario de emisiones de política, en el cual el usuario escoge una trayectoria diferente que refleje alguna política internacional para la reducción de emisiones de GEI, 4) el tipo de actitud hacia la incertidumbre, requerida para obtener la distribución de máxima entropía para las probabilidades en cuanto a los cambios en la temperatura global, 5) la distribución de probabilidades de los patrones de escala utilizados para regionalizar los cambios en temperatura, 6) la política de reducción de los efectos de la isla de calor en la que se puede especificar qué porcentaje se podría abatir del incremento en la temperatura causado por este fenómeno bajo el escenario de política y 7) la tasa de descuento que se utilizará para traer a valor presente los impactos agregados de cambio climático.

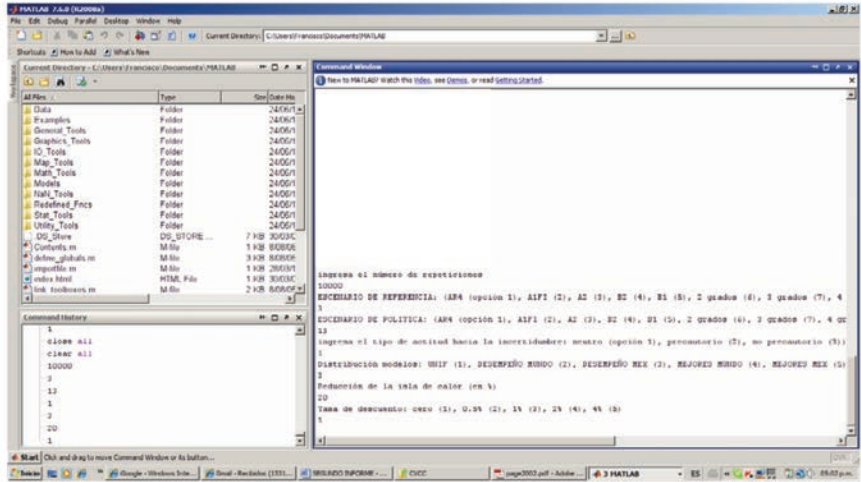


FIGURA 15. Interfaz en MATLAB del modelo estocástico M-CCA/UNAM

Valuación de los costos económicos del cambio climático en el Distrito Federal

En esta sección se presenta un ejemplo de los resultados que se pueden obtener mediante el modelo estocástico desarrollado. Todas las estimaciones aquí presentadas tienen las siguientes características: el número de simulaciones realizadas fue 10,000; el escenario de emisiones de referencia escogido es el A2 del SRES; los escenarios de política internacional corresponden a estabilizaciones de las concentraciones atmosféricas de GEI en 350, 450 y 550 ppm; se escogió una actitud neutra hacia la incertidumbre; los patrones de escala utilizados para simular los cambios en las temperaturas regionales se obtuvieron mediante una distribución que asigna mayores probabilidades a los modelos que muestran un mejor desempeño para reproducir el clima observado de México; los escenarios de política local asumen diversas reducciones porcentuales en el efecto de la isla de calor sobre las temperaturas locales; los experimentos se muestran para tasas de descuento de 0, 1 y 4%.

Resultados *Evaluación de posibles políticas internacionales para mitigar el cambio climático: costos potenciales del cambio climático en la economía del Distrito Federal bajo un escenario de inacción y distintos escenarios de estabilización de las concentraciones atmosféricas de GEI*

Como se muestra en la Tabla 6, bajo el escenario de inacción (A2), para finales de siglo la temperatura anual en el Distrito Federal se incrementaría entre 3.37 °C y 7.88 °C, con 5.42 °C como valor medio. En esa misma tabla se observan las estimaciones del incremento en la temperatura para tres escenarios de estabilización que se mencionan frecuentemente como posibles metas en las negociaciones internacionales: 350, 450 y 550 ppm. Es de notar que, para alcanzar incrementos en la temperatura significativamente menores a los que resultan bajo el escenario de inacción, se necesitaría un esfuerzo internacional de mitigación mucho mayor que el asociado con una estabilización en 550 ppm. Más aún, inclusive bajo el escenario de estabilización más ambicioso que se ha planteado en las negociaciones (350 ppm), los incrementos en la temperatura media anual estarían en promedio alrededor de 2.8 °C y no se podrían descartar aumentos superiores a 4 °C. De esta forma,

TABLA 6. Incremento de la temperatura media anual para el 2100 en el Distrito Federal bajo el escenario de emisiones A2 (inacción) y para distintos escenarios de estabilización de concentraciones de GEI. Las estimaciones incluyen el efecto de la isla de calor. Los números entre paréntesis representan un intervalo de 95% de confianza.

Escenario de emisiones	Incremento en la temperatura media anual en el Distrito Federal (°C)
A2	5.42 (3.37, 7.88)
550 ppm	5.08 (2.92, 7.60)
450 ppm	3.84 (2.31, 5.63)
350 ppm	2.79 (1.73, 4.00)

además de las acciones a nivel internacional para estabilizar las concentraciones de GEI, resulta de suma importancia el diseño e instrumentación de políticas locales tendientes a mejorar las condiciones ambientales y socioeconómicas de la ciudad y a reducir los incrementos en las temperaturas locales causados por el efecto de la isla de calor. Como se muestra más adelante, la instrumentación de políticas locales en este sentido lograría atenuar de manera importante los impactos del cambio climático en el Distrito Federal.

Para ejemplificar, la Figura 16 muestra los histogramas correspondientes a las simulaciones de los incrementos en la temperatura media anual en la delegación Cuauhtémoc para el año 2100, bajo un escenario de inacción (A2) y bajo los escenarios de estabilización en 450 ppm y 350 ppm. En el caso del escenario de inacción, el incremento medio en la temperatura es de 6.03 °C; los incrementos se hayan entre 3.98 °C y 8.5 °C, con un intervalo de 95% de confianza.

Los escenarios de estabilización llevan a incrementos en las temperaturas claramente menores, aunque como se mencionó anteriormente, los incrementos son considerables aún en el mejor de los escenarios. Bajo un escenario de estabilización en 450 ppm, el intervalo de 95% de confianza está definido en el rango de temperaturas de 2.92 °C a 6.24 °C, con un incremento medio de 4.45 °C. Finalmente, en el escenario de estabilización en 350 ppm, el incremento en la temperatura media anual corresponde a 3.39 °C, con un intervalo de 95% de confianza de 2.34 °C a 4.62 °C.

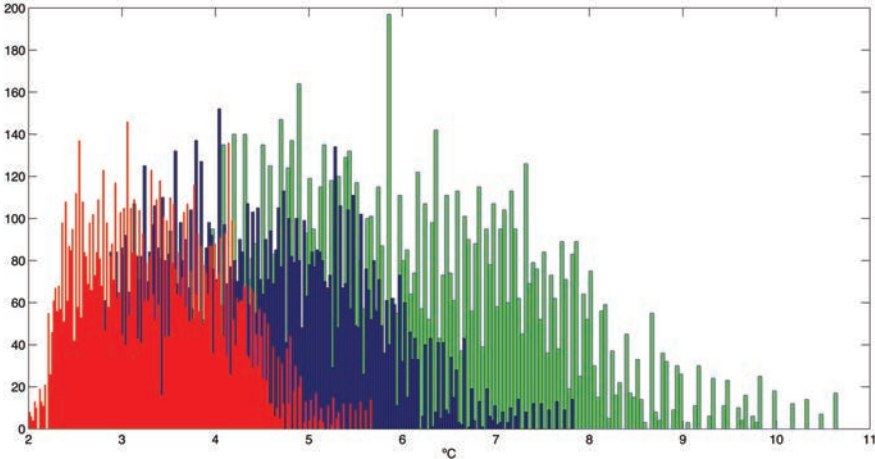


FIGURA 16. Histogramas de los incrementos en la temperatura media anual simulados para la delegación Cuauhtémoc, para el año 2100. En verde se muestran las simulaciones correspondientes al escenario de inacción A2, en azul los incrementos bajo un escenario de estabilización en 450 ppm y en rojo los correspondientes a un escenario de estabilización en 350 ppm.

La Tabla 7 muestra los costos para el Distrito Federal asociados con este escenario de inacción y los correspondientes a los tres escenarios de estabilización mencionados anteriormente, utilizando tres tasas de descuento distintas para traer a valor presente los montos correspondientes a los impactos esperados durante el siglo. En esta tabla se puede apreciar la importancia que tiene la tasa de descuento que se elija para la valuación de los costos. Cabe señalarse que la elección de tasas de descuento es muy distinta para valuar proyectos de inversión comunes en comparación con la valuación de problemas ambientales como los que el cambio climático plantea (Martínez-Alier, 2001). Mientras que en los primeros existen justificaciones económicamente racionales para escoger tasas de descuento positivas (preferencias temporales puras, la creciente riqueza y la productividad del capital), en los segundos estas justificaciones crean problemas éticos que las harían difícilmente defendibles y que tienen que ver con la justicia intergeneracional, así como con los posibles cambios irreversibles en los sistemas naturales y humanos que el cambio climático puede causar. Con tasas de descuento positivas, el futuro pierde importancia y el futuro lejano no influye sobre las decisiones actuales. De hecho, con tasas de descuento altas, no importa la magnitud de los impactos que el cambio climático pudiera causar: la política razonable a seguir sería “no hacer nada”.

TABLA 7. Costos acumulados hasta el 2100 para el Distrito Federal bajo el escenario de emisiones A2 (inacción) y para distintos escenarios de estabilización de concentraciones de GEI. Los números entre paréntesis representan un intervalo de 95% de confianza.

Costos acumulados del cambio climático hasta el 2100 (Las cifras representan el número de veces que se perdería el PIB actual)			
ESCENARIO	TASA DE DESCUENTO		
	0%	1%	4%
A2 (inacción)	19.10 (5.22, 45.79)	9.06 (2.51, 21.68)	1.40 (0.44, 3.08)
550 ppm	17.35 (4.52, 43.04)	8.33 (2.18, 20.29)	1.29 (0.39, 2.92)
450 ppm	10.77 (3.15, 24.38)	5.25 (1.58, 11.65)	0.87 (0.29, 1.80)
350 ppm	6.50 (2.03, 13.70)	3.25 (1.02, 6.75)	0.60 (0.20, 1.16)

Actualmente existe un amplio debate sobre la tasa de descuento que se debe utilizar en estudios sobre los impactos económicos del cambio climático (Fankhauser y Tol, 2005; Davidson 2006; van der Bergh 2009). Los autores consideran que lo recomendable es escoger una tasa de descuento cero (o cercana a cero) con la que se asegure que los impactos futuros y, por ende, el nivel de bienestar de las generaciones futuras no queden subrepresentados en el análisis. Algunos de los fundamentos de este tipo de recomendaciones se puede encontrar en Dasgupta *et al.* (1999) Posner (2004), Stern (2006) y Ackerman (2008). Sin embargo, debido a que se reconoce que la tasa de descuento no se estima ni calcula, sino que se elige mediante consideraciones fuertemente subjetivas, también se muestran los resultados utilizando tasas de descuento positivas de hasta 4%.

Así, con una tasa de descuento de 0%, los costos acumulados del cambio climático equivaldrían a perder en promedio cerca de 19 veces el PIB actual del Distrito Federal; considerando un intervalo de confianza de 95%, éstos podrían representar entre 5 y 46 veces el PIB actual. Independientemente de la tasa que se elija, los costos estimados son considerablemente mayores a lo que se presenta en *La Economía del Cambio Climático en México* (SHCP-SEMARNAT, 2009) y son comparables en magnitud a los mostrados en el Reporte Stern (Stern, 2006).

No necesariamente todos los escenarios de estabilización que se han propuesto llevarían a una situación considerablemente mejor para la ciudad. Una estabilización a 550 ppm implicaría enfrentar, en el presente siglo, prácticamente los mismos costos que bajo el escenario de inacción (A2); aunque claramente en un horizonte de tiempo mayor al contemplado aquí, los costos del escenario de inacción serían considerablemente mayores.

Bajo los escenarios de estabilización a 450 y 350 ppm, los costos para el Distrito Federal representarían en promedio 10.77 y 6.5 veces el PIB actual; sin embargo, éstos podrían alcanzar 24.38 y 13.7 veces, respectivamente. De esta forma, una estabilización en 350 ppm se traduciría en beneficios (pérdidas evitadas) entre 3.19 y 31.59 veces el PIB actual, con un promedio de 12.60. Éstos son los beneficios para el Distrito Federal con los que se deben contrastar los costos que implicaría alcanzar un acuerdo internacional que asegure este nivel de estabilización de las concentraciones atmosféricas de GEI. Asumir este compromiso de mitigación internacional sería conveniente para la ciudad si los costos fueran menores que los beneficios.

La Figura 17 muestra la evolución que tendría el PIB del Distrito Federal durante el presente siglo, de acuerdo con tres diferentes escenarios: 1) el escenario A2 si no existieran impactos del cambio climático (línea azul), 2) si se siguiera un escenario de inacción —en este caso el escenario de referencia A2— y se descuentan los costos provocados por cambio climático (línea verde) y 3) si se implementa un acuerdo internacional que establezca las concentraciones de GEI en 350 ppm (línea roja).

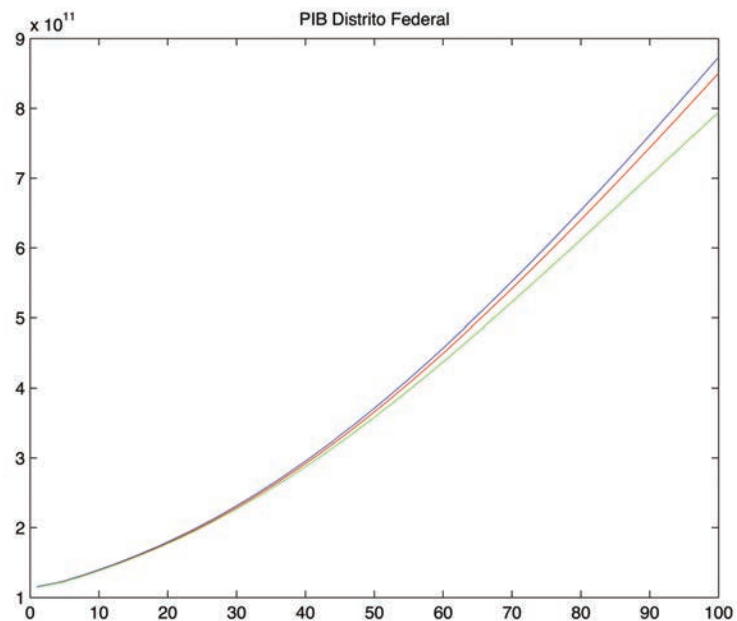
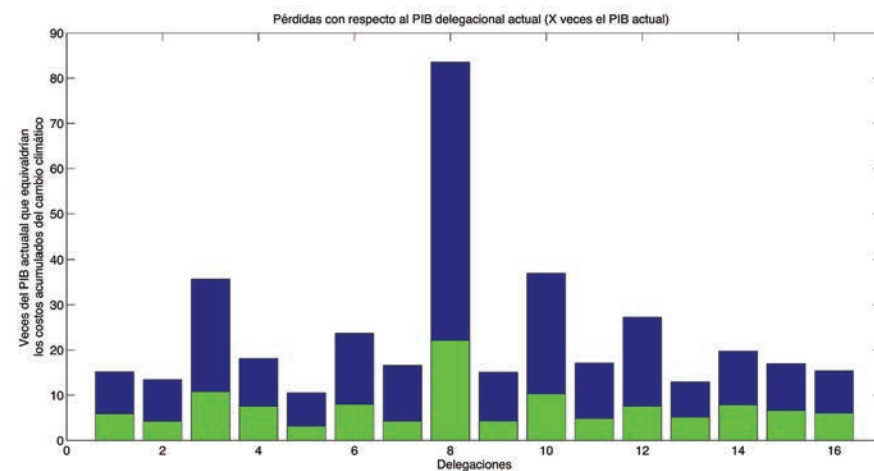


FIGURA 17. Evolución del PIB del Distrito Federal durante el periodo 2001-2100. La línea azul representa la evolución sin cambio climático de acuerdo al escenario de emisiones A2. La línea verde representa el PIB de la entidad descontando los impactos del cambio climático en el caso de inacción. La línea roja muestra la evolución del PIB si se adopta un escenario de estabilización en 350 ppm.

Sin embargo, aún bajo los escenarios de estabilización más ambiciosos que podrían resultar de las negociaciones internacionales, el riesgo que enfrenta el Distrito Federal es enorme y podría comprometer seriamente el desarrollo de la entidad. Por lo tanto, se requieren no sólo acciones globales para mitigar la emisión de GEI, sino que se necesitan urgentemente esfuerzos locales adicionales de adaptación.

Los resultados también muestran que los costos del cambio climático no se distribuirán de manera uniforme entre las delegaciones: las que presentarían impactos mayores respecto a su PIB actual son las que, en general, actualmente tienen un

menor nivel de desarrollo e ingreso per cápita: Milpa Alta, Tláhuac, Xochimilco e Iztapalapa (Figura 19). En consecuencia, resulta claro que una variable de política de gran importancia para reducir los impactos del cambio climático en la economía del Distrito Federal consistiría en mejorar la distribución del ingreso y en reducir las diferencias socioeconómicas y de nivel de desarrollo entre delegaciones. Una ciudad más equitativa y con niveles socioeconómicos, de servicios e infraestructura más uniformes permitiría dar condiciones para que los efectos del cambio climático puedan ser enfrentados de mejor manera y así reducir sus impactos y costos. Las gráficas de la Figura 20 (paneles a-d) muestran la evolución del ingreso per cápita por delegación para el presente siglo, de acuerdo con los tres escenarios antes mencionados: sin impactos de cambio climático (líneas azules), bajo el escenario de referencia o inacción (líneas verdes) y bajo el escenario de política (líneas rojas).



NOTA: Los números en el eje de las X representan las delegaciones en el Distrito Federal de la siguiente manera: 1 Azcapotzalco, 2 Coyoacán, 3 Cuajimalpa, 4 Gustavo A. Madero, 5 Iztacalco, 6 Iztapalapa, 7 La Magdalena Contreras, 8 Milpa Alta, 9 Álvaro Obregón, 10 Tláhuac, 11 Tlalpan, 12 Xochimilco, 13 Benito Juárez, 14 Cuauhtémoc, 15 Miguel Hidalgo, 16 Venustiano Carranza.

FIGURA 18. Costos acumulados respecto al PIB delegacional actual, bajo el escenario de inacción (azul) y bajo el escenario de estabilización a 350 ppm (verde)

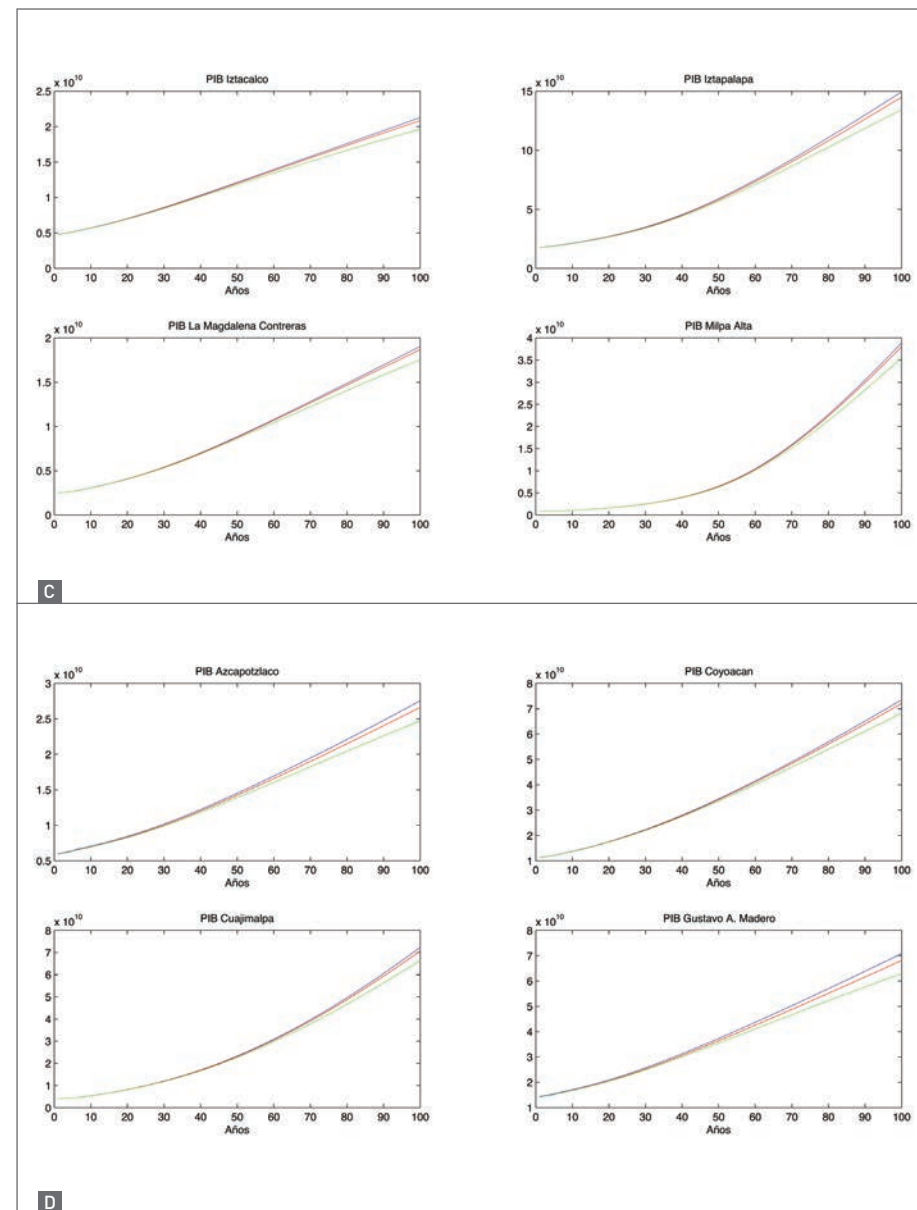
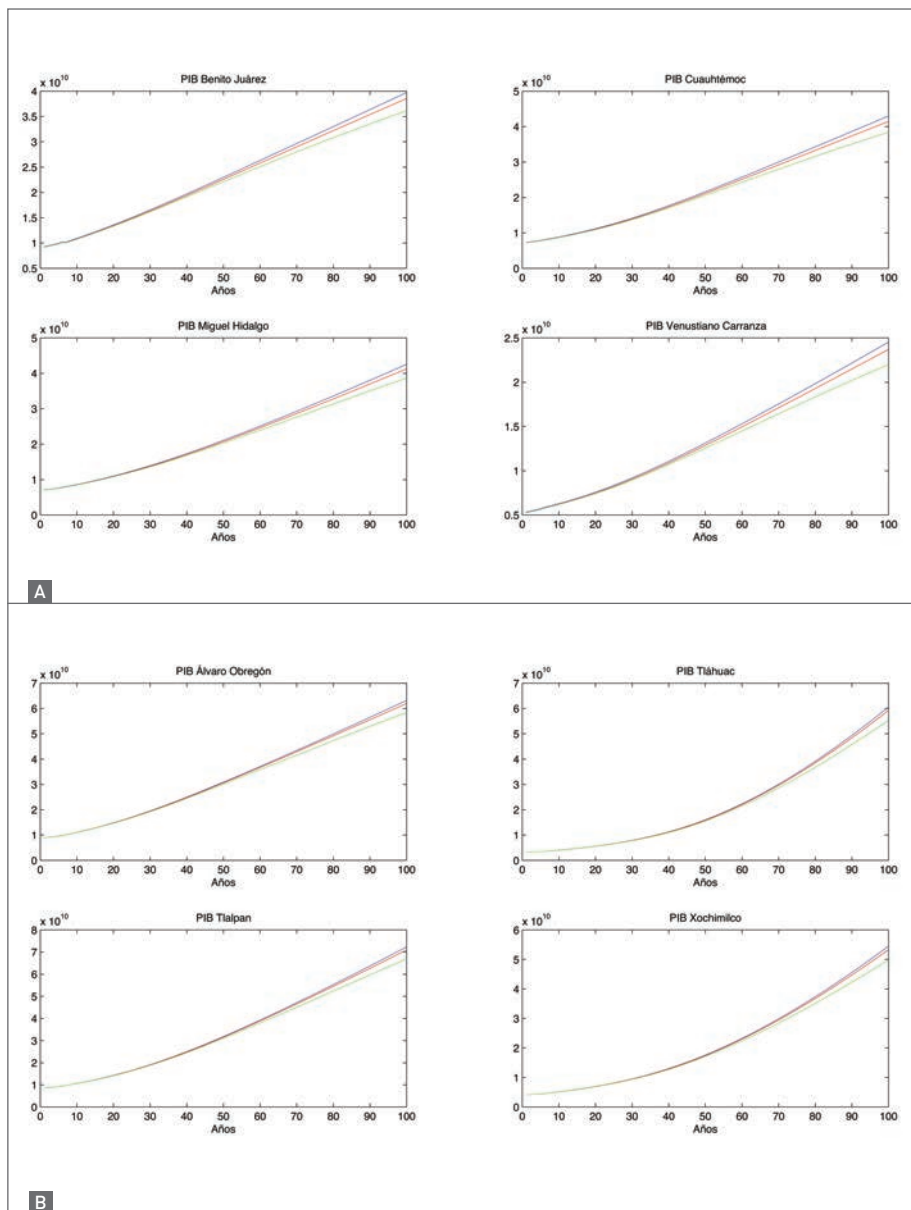
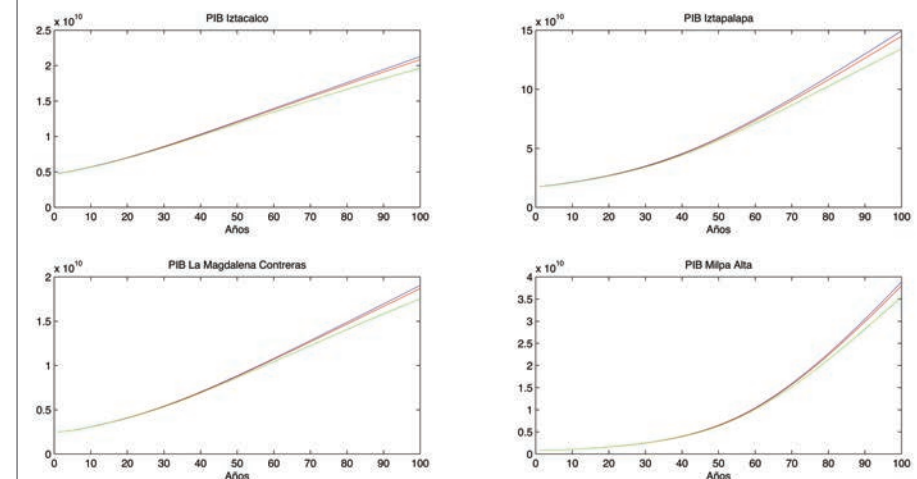
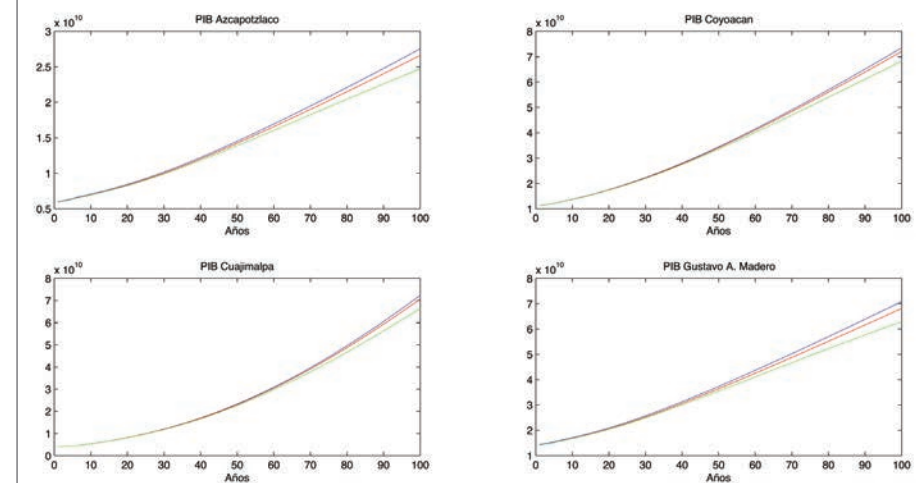


FIGURA 19. Evolución del PIB per cápita por delegación para el periodo 2001-2100. Las líneas azules representan la evolución sin cambio climático de acuerdo al escenario A2. Las líneas verdes representan el PIB per cápita por delegación descontando los impactos del cambio climático en el caso de inacción. Las líneas rojas muestran la evolución del PIB per cápita si se adopta un escenario de estabilización en 350 ppm.



C



D

Si siguiendo una metodología similar a las presentadas en Datt (1998), Anderson (2006) y Stern (2006), y utilizando la elasticidad ingreso-pobreza calculada para México (Cárdenas-Rodríguez y Luna-López, 2005), se obtuvieron estimaciones básicas del número de personas adicionales en condiciones de pobreza que resultarían de las reducciones en el crecimiento en el PIB mostradas anteriormente: de acuerdo

con el escenario de inacción, podrían ascender a más de un millón (alrededor de 10% de la población total de la entidad en el año 2100) para finales de siglo, con un aumento promedio de alrededor de 450,000 (Tabla 8). Una vez más, las implicaciones socioeconómicas del cambio climático, aún en el caso de una estabilización en 350 ppm, podrían ser severas: la reducción en el crecimiento del PIB causado por el cambio climático podría implicar un aumento en el número de pobres equivalente a 1% de la población del Distrito Federal en el 2100 en promedio y de hasta 2.4%, considerando el límite superior de un intervalo de 95% de confianza. La Figura 21 muestra la evolución del número de personas adicionales en situación de pobreza durante este siglo, para el escenario de inacción A2 y para un escenario de estabilización en 350 ppm.

TABLA 8. Número de personas adicionales en situación de pobreza por el cambio climático en el 2100 (en miles) bajo el escenario de emisiones A2 (inacción) y para distintos escenarios de estabilización de concentraciones de GEI. Los números entre paréntesis representan un intervalo de 95% de confianza.

ESCENARIOS DE EMISIONES	Número de personas adicionales en situación de pobreza por el cambio climático en el 2100 (en miles)
A2	441.22 (97.96, 1281.06)
550 ppm	392.46 (81.16, 1175.86)
450 ppm	212.58 (50.92, 560.26)
350 ppm	103.97 (26.11, 249.20)

Debido a que la distribución de los impactos se concentraría en mayor medida en las delegaciones con menor nivel de desarrollo, las políticas tendientes a mejorar la equidad en ingreso entre delegaciones podrían ser contrarrestadas por los impactos del cambio climático. Esto podría retrasar la convergencia entre delegaciones y la consecución de metas de política social, como la reducción de la pobreza, a menos de que se diseñen e instrumenten políticas que contemplen explícitamente el agravamiento de las condiciones sociales por los impactos del cambio climático.

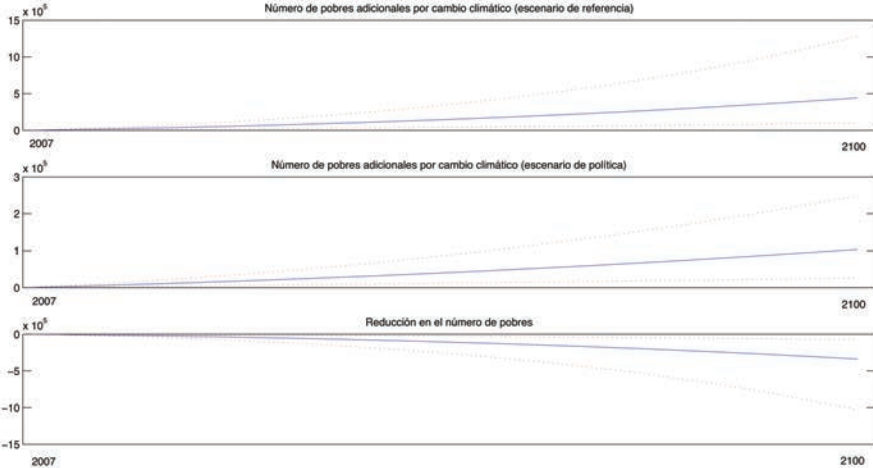


FIGURA 20. Evolución del número de personas adicionales en situación de pobreza por el cambio climático en el 2100 (en miles) bajo el escenario de emisiones A2 (inacción) y un escenario de estabilización en 350 ppm. Las líneas rojas punteadas muestran un intervalo de 95% de confianza.

Estas estimaciones deben entenderse únicamente indicativas, pues sobresimplifican el problema, no consideran cambios en la distribución del ingreso y se basan en que los cambios en pobreza están fuertemente influenciados por el crecimiento económico (Anderson, 2006). Sin embargo, dado el extenso periodo de análisis y la clara dificultad que existiría para proyectar las diversas variables socioeconómicas (y sus relaciones dinámicas) que determinan los niveles de pobreza para horizontes tan largos, se considera que, a pesar de las limitaciones antes mencionadas, estas estimaciones aportan información relevante para entender las diversas dimensiones de los impactos que el cambio climático tendría para la ciudad.

Evaluación de posibles políticas locales para atenuar los impactos del cambio climático: costos potenciales del cambio climático en la economía del Distrito Federal bajo un escenario de inacción y distintos escenarios de reducción del efecto de la isla de calor

De manera característica, las ciudades presentan un contraste térmico entre las áreas centrales con temperaturas más altas y las rurales o suburbanas con temperaturas menores. Este fenómeno se conoce como isla de calor y está relacionada con la forma en que se disipa la energía proveniente del Ssol (Tejeda-Martínez y Jáuregui-Ostos, 2005; Estrada *et al.* 2009).

De esta forma, la superficie natural en las ciudades se encuentra recubierta con materiales más densos y con mayor capacidad y conductividad térmicas en calles y edificios que forman cañones urbanos. Éstos, a su vez, dificultan la pérdida del calor acumulado durante el día y restringen la circulación del viento. El grado de este contraste térmico dependerá tanto de las características geográficas como del tipo de proceso de urbanización de cada ciudad (Oke, 1973).

Para modelar el efecto de la isla de calor sobre la temperatura local se recurrió a un método simple comúnmente utilizado en la literatura (Oke, 1973; Torok *et al.*, 2001; Martín-Vide, 2003; Jáuregui y Tejeda, 2004). Dicho método consiste en modelar el cambio en la temperatura local causado por la isla de calor en función de la población. La Tabla 9 muestra el incremento en la temperatura a nivel delegación para el año 2100; de acuerdo con estas estimaciones, la temperatura media anual en el Distrito Federal se incrementaría en 1.08 °C en promedio por el efecto de la isla de calor. Las delegaciones con mayores incrementos corresponden a las que forman la ciudad central (Azcapotzalco, Gustavo A. Madero, Benito Juárez, Cuauhtémoc, Miguel Hidalgo y Venustiano Carranza); es decir, la parte que muestra un mayor nivel de urbanización. Sin embargo, los incrementos son menores en el primero (Coyoacán, Cuajimalpa de Morelos, Iztacalco e Iztapalapa) y segundo contornos de la ciudad (La Magdalena Contreras, Milpa Alta, Álvaro Obregón, Tláhuac y Tlalpan), cuyos niveles de urbanización son menores y en donde se encuentran las reservas ecológicas de la entidad.

TABLA 9. Proyecciones del incremento en la temperatura media anual en el Distrito Federal por el efecto de la isla de calor para finales de siglo

DELEGACIÓN	Incremento en la temperatura media anual por isla de calor (°C)
Azcapotzalco	1.57
Coyoacán	0.93
Cuajimalpa de Morelos	0.91
Gustavo A. Madero	1.87
Iztacalco	0.71
Iztapalapa	1.14
La Magdalena Contreras	0.43
Milpa Alta	0.60
Álvaro Obregón	0.65
Tláhuac	0.67
Tlalpan	0.64
Xochimilco	0.64
Benito Juárez	1.60
Cuauhtémoc	1.69
Miguel Hidalgo	1.63
Venustiano Carranza	1.58

A continuación, se analizan los posibles beneficios de políticas locales dirigidas a atenuar los efectos de la isla de calor mediante, por ejemplo, la mejora de las estrategias bioclimáticas y la recuperación de áreas verdes, ríos y cuerpos de agua de la ciudad, entre otras. Con este tipo de medidas se podrían contrarrestar parcialmente los incrementos en las temperaturas causados por el cambio climático, además de obtener otros beneficios para la población en términos de salud, mejoramiento ambiental, microclimas y paisaje, así como un posible aumento en la disponibilidad de agua, entre otros (Jáuregui, 1991; Martínez-Arroyo y Jáuregui, 2000).

TABLA 10. Pérdidas evitadas por abatir el incremento en las temperaturas locales asociado a la isla de calor, en comparación con el escenario de inacción A2. Los números entre paréntesis representan un intervalo de 95% de confianza.

Pérdidas evitadas por reducción de la isla de calor (en unidades de PIB actual)			
REDUCCIÓN DE LA ISLA DE CALOR	TASA DE DESCUENTO		
	0%	1%	4%
10%	0.77 (0.33, 1.57)	0.35 (0.13, 1.00)	0.09 (0.04, 0.16)
20%	1.94 (0.45, 4.97)	0.92 (0.21, 2.57)	0.19 (0.07, 0.39)
30%	2.60 (0.88, 5.17)	1.31 (0.38, 3.50)	0.26 (0.11, 0.55)
40%	3.50 (1.09, 8.60)	1.71 (0.54, 4.36)	0.34 (0.14, 0.70)
50%	4.21 (1.53, 8.79)	2.07 (0.76, 4.45)	0.42 (0.18, 0.77)
60%	4.74 (1.65, 10.39)	2.35 (0.83, 5.32)	0.48 (0.20, 0.92)
70%	5.11 (2.10, 10.74)	2.55 (1.05, 5.54)	0.52 (0.24, 0.99)
80%	6.61 (2.48, 15.06)	3.26 (1.23, 7.52)	0.63 (0.27, 1.24)
90%	7.07 (2.55, 16.14)	3.50 (1.27, 8.05)	0.68 (0.28, 1.34)
100%	7.50 (2.75, 17.41)	3.72 (1.38, 8.68)	0.72 (0.30, 1.45)

La Tabla 10 muestra los beneficios estimados, en términos de pérdidas evitadas, que se podrían obtener disminuyendo el efecto de la isla de calor en comparación con el escenario A2 presentado anteriormente.

Así, por ejemplo, una disminución de 10% en el incremento en las temperaturas locales causado por la isla de calor, representaría para la ciudad un beneficio de entre 33% y 157% del PIB actual, con un valor medio de 77%. Huelga decir

que posiblemente estas estimaciones estén subvaluadas debido a que no contemplan beneficios adicionales como los mencionados en el párrafo anterior. Una vez más, estas cifras podrían ser interpretadas como límites de los costos que sería razonable asumir bajo un análisis costo-beneficio para mitigar los efectos de la isla de calor. En la misma tabla se observa que —bajo condiciones de inacción A2— sería enorme el costo de no instrumentar ninguna política para reducir la isla de calor durante el presente siglo, valuado entre 2.75 y 17.41 veces el PIB actual del Distrito Federal, con un costo promedio de 7.5 veces.

Como se comentó anteriormente, una variable de política muy importante para reducir los impactos del cambio climático en la ciudad consistiría en reducir las desigualdades en el nivel de desarrollo entre las delegaciones. Por ejemplo, tomando como referencia el escenario A2, si todas las delegaciones alcanzaran un nivel de desarrollo similar al de la delegación Benito Juárez, los costos del cambio climático para la ciudad se reducirían entre 0.64 y 6.93 veces el PIB actual, con un promedio de 2.79 veces. Claramente, los beneficios socioeconómicos totales de políticas dirigidas a reducir las desigualdades entre las delegaciones del Distrito Federal serían mucho mayores que las que se refieren únicamente al cambio climático.

Finalmente, se presenta un ejemplo de una posible combinación de acciones a nivel internacional y local dirigidas a aminorar los impactos del cambio climático. Como se mostró anteriormente, suponiendo que se adoptara un acuerdo internacional que estabilizara las concentraciones atmosféricas de GEI en 450 ppm, el riesgo y los costos del cambio climático para la ciudad aún serían muy grandes. Como se muestra en la Tabla 11, a nivel local todavía existirían diversas acciones de política que se podrían implementar que, como se comentó con anterioridad, además de reducir significativamente los impactos del cambio climático, ofrecerían beneficios adicionales muy valiosos para los habitantes de la ciudad.

De esta forma, bajo el escenario de estabilización en 450 ppm y una reducción de 20% del efecto de la isla de calor sobre las temperaturas locales, los costos evitados representarían 1.39 veces el PIB actual del Distrito Federal, en comparación con un escenario en el cual no se incluyen políticas locales. Si esta medida se combinara con una mejora en el nivel de desarrollo de las delegaciones, los resultados muestran que los costos evitados serían casi tres veces el PIB actual. Además, como se puede observar en la Tabla 11, las peores pérdidas (24.38 veces el PIB actual) que ocurrirían bajo un escenario de estabilización a 450 ppm sin la instrumentación de políticas locales, se reducirían alrededor de 24%, limitando de forma importante el riesgo que enfrentaría la ciudad.

TABLA 11. Pérdidas evitadas mediante la instrumentación de políticas públicas locales, en comparación con un escenario de estabilización en 450 ppm. Los números entre paréntesis representan un intervalo de 95% de confianza.

Costos acumulados de cambio climático hasta el 2100 (Las cifras representan el número de veces que se perdería el PIB actual)			
ESCENARIO	TASA DE DESCUENTO		
	0%	1%	4%
450 ppm	10.77 (3.15, 24.38)	5.25 (1.58, 11.65)	0.87 (0.29, 1.80)
450 ppm, -20% isla de calor	9.38 (2.62, 21.16)	4.52 (1.29, 10.09)	0.77 (0.22, 1.56)
450 ppm, -20% isla de calor, niveles similares de desarrollo	8.04 (2.22, 18.47)	4.51 (1.50, 9.50)	0.72 (0.25, 1.43)

Evaluación de los impactos socioeconómicos potenciales del cambio climático por grado centígrado de incremento en la temperatura global

Frecuentemente los objetivos de las negociaciones internacionales se expresan en grados centígrados por encima de la temperatura global preindustrial. Sin embargo, una gran cantidad de actores, incluyendo la sociedad civil, el gobierno y hasta los propios negociadores, no cuentan con información suficiente sobre las consecuencias que se podrían esperar bajo cada uno de ellos. Esta sección pretende abordar esta carencia y ofrecer al lector una estimación de los posibles costos del cambio climático en términos del porcentaje del PIB que se perdería y del número de personas adicionales que se encontrarían en situación de pobreza por cada grado que se incrementara la temperatura global.

La Figura 21 muestra las reducciones porcentuales en el PIB del Distrito Federal que se estima que ocurrirían por cada grado centígrado de aumento en la temperatura global. Como se observa, aún en la parte baja del rango de aumento proyectado para la temperatura global, las diferencias entre el PIB bajo escenarios con y sin cambio climático serían considerables. Por ejemplo, un aumento de dos grados centígrados en la temperatura global —el valor al que actualmente se busca limitar el incremento en la temperatura global en las negociaciones internacionales— podría resultar en un PIB entre 1.29% y 6.8% menor, con una

disminución media de 3.58%. Si la temperatura global se estabilizara en 2 °C por arriba de la temperatura preindustrial, el Distrito Federal perdería un porcentaje del PIB anual en el rango de 1.29% a 6.8%, cada año que la temperatura global se mantuviera en ese nivel en caso de que no se tomaran medidas de adaptación enfocadas a reducir estas pérdidas.

Asimismo, el porcentaje del PIB perdido aumenta rápidamente por cada grado que incrementa la temperatura global; para un aumento de 6 °C, el porcentaje perdido del PIB se encontraría en un intervalo de entre 4.84% y 48.1%, con una media de 18.36%. Como en el caso anterior, ésta sería la pérdida porcentual que ocurriría cada año que la temperatura global se mantuviera 6 °C por encima del promedio preindustrial.

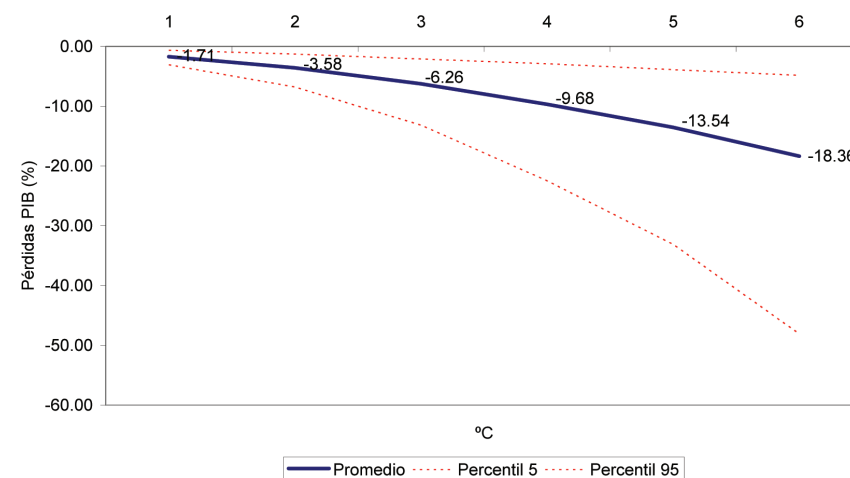


FIGURA 21. Impactos potenciales del cambio climático en la economía del Distrito Federal por cada grado centígrado de incremento en la temperatura global. Las líneas rojas punteadas representan un intervalo de 95% de confianza.

Utilizando la metodología antes mencionada (Datt, 1998; Anderson, 2006; Stern, 2006), se estimó el número de personas adicionales que se encontrarían en situación de pobreza como consecuencia directa de cambio climático. Así, como muestra la Figura 23, ante una estabilización en 2 °C por arriba de la temperatura global preindustrial, cada año alrededor de 153,000 personas caerían

en situación de pobreza como consecuencia del cambio climático en el Distrito Federal. Como se puede observar, las consecuencias de un aumento de 6 °C en la temperatura global serían desastrosas, alcanzando entre un cuarto de millón y hasta más de tres millones de personas adicionales en situación de pobreza.

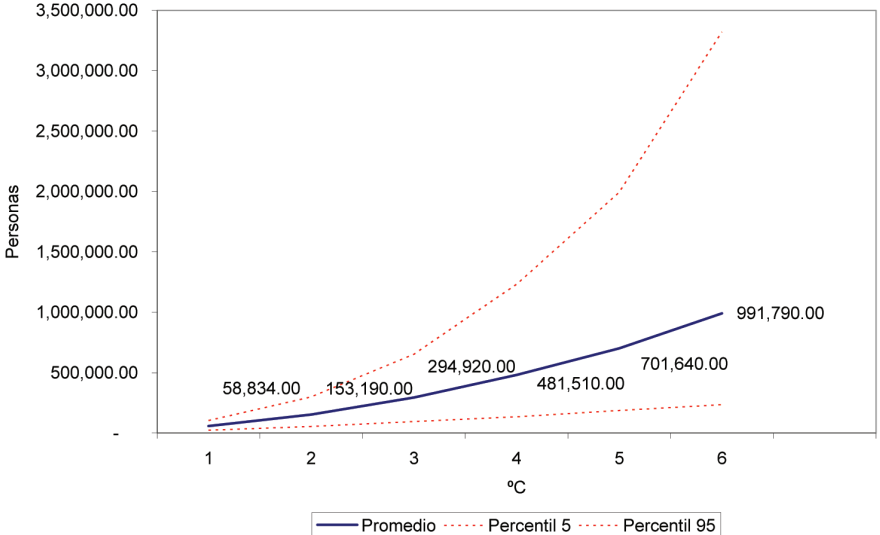


FIGURA 22. Número de personas adicionales que se encontrarían en situación de pobreza en el Distrito Federal por grado centígrado de incremento en la temperatura global. Las líneas rojas punteadas representan un intervalo de 95% de confianza.

Conclusiones

El cambio climático sin duda representará el mayor reto ambiental que la ciudad enfrentará en el presente siglo, causando impactos significativos en diversos sectores y con profundas implicaciones socioeconómicas. Los resultados muestran que el cambio climático podría acarrear costos enormes que no se distribuirían de manera uniforme entre las delegaciones, sino que tendría peores impactos sobre las delegaciones con menor desarrollo y en particular sobre la población con menores recursos. De esta forma, el cambio climático podría retrasar la convergencia entre delegaciones y la consecución de metas de política social, como la reducción de la pobreza, a menos de que se diseñen e instrumenten políticas que contemplen explícitamente el agravamiento de las condiciones sociales por los impactos de este fenómeno.

Considerando una tasa de descuento cero, los costos acumulados del cambio climático durante este siglo para el Distrito Federal podrían representar hasta 46 veces el PIB actual de la entidad, con un valor medio de 19 veces. Estos impactos podrían llevar a que existiera más de un millón de personas adicionales en situación de pobreza a fines de este siglo como consecuencia del cambio climático, en ausencia de políticas adicionales para enfrentarlo y para reducción de la pobreza.

La dimensión de los costos potenciales que el cambio climático implica para la ciudad sin duda obliga a buscar alternativas que permitan reducir el riesgo que enfrentaría. Entre éstas se incluyen tanto las dirigidas a la reducción de las emisiones globales de GEI, como las locales enfocadas a mejorar las condiciones ambientales (reducción de los efectos de la isla de calor, reforestación y recuperación de cuerpos de agua, entre otras) y socioeconómicas, como mejorar la distribución del ingreso, reducir las diferencias socioeconómicas y de nivel de desarrollo entre delegaciones, mejorar las capacidades de la población y la infraestructura para enfrentar el cambio climático.

Los resultados muestran que, aunque es indispensable un acuerdo internacional para llegar a una estabilización a 450 ppm o menos para reducir los impactos esperados de forma significativa, difícilmente alguna medida por separado, ya sea

global, nacional o local, será suficiente. En cambio, combinaciones de políticas en estos tres niveles sí lograrían reducir de forma importante los impactos del cambio climático y, particularmente a nivel local, representarían beneficios adicionales muy importantes para la población, más allá de los que se refieren únicamente al cambio climático.

En este estudio se ponen de manifiesto necesidades de investigación para tener una mejor visión de las implicaciones del cambio climático para la ciudad y poder orientar mejor la toma de decisiones. Entre éstas se encuentra el análisis de costos que representaría para la entidad asumir alguno de los posibles acuerdos internacionales para estabilizar las concentraciones atmosféricas de GEI, qué sectores de la economía se verían más afectados y cuáles serían algunas acciones que se pudieran instrumentar para reducirlos. Asimismo, resulta indispensable analizar la viabilidad, potencial y costos de estrategias concretas para la reducción de los efectos de la isla de calor, el mejoramiento del ambiente y de las condiciones socioeconómicas de la ciudad. Resulta también claro que el enfoque del estudio debe extenderse a nivel regional, considerando un área metropolitana que se ha denominado la corona de ciudades.

La Ciudad de México cuenta con un acervo importante de estudios sobre los problemas que enfrenta actualmente. Una revisión cuidadosa de todas las propuestas incluidas en dichos estudios permitiría derivar medidas de acción inmediatas, tanto en el ámbito socioeconómico como ambiental, que si bien no contemplan explícitamente el cambio climático, sí contribuirían a reducir nuestra vulnerabilidad al fenómeno y encaminarnos hacia la sustentabilidad. El Programa de Acción Climática de la Ciudad de México constituye un avance importante en este sentido pues aprovecha el conocimiento y andamiaje institucional disponibles para instrumentar medidas de mitigación y adaptación inmediatas, con el fin de responder a algunos de los retos que el cambio climático implica en el corto plazo y crear una base para construir estrategias y políticas de más largo aliento.

No obstante, esto debe considerarse como un punto de partida en tanto el cambio climático requiere importantes esfuerzos de investigación adicionales, con enfoque multidisciplinario, integral y con visión de largo plazo, que aborden directamente los problemas asociados con el cambio de clima que experimenta-

remos en este siglo. Desafortunadamente, la ciudad actualmente cuenta con un número muy reducido de este tipo de estudios. El subsanar estas necesidades debe ser una prioridad en la agenda del gobierno del Distrito Federal, en temas tan variados como la construcción de escenarios de cambio climático locales —ya sea utilizando modelos climáticos regionales o métodos estadísticos—, el estudio de la vulnerabilidad y la evaluación de los impactos potenciales del cambio climático en sectores específicos, particularmente en agua, salud, seguridad alimentaria, suelos de conservación y biodiversidad, energía y transporte, por mencionar algunos; y estudios sobre capacidades, viabilidad y costos de mitigación y de adaptación.

Sin embargo, quizá el mayor esfuerzo que deba realizarse se encuentra en crear los mecanismos que integren la investigación con la toma de decisiones para asegurar que la investigación que se realice sea políticamente relevante y sus resultados se conviertan en política pública. En este sentido, cabe resaltarse que la ciudad ya inició el Centro Virtual de Cambio Climático, que fue diseñado expresamente para abordar esta tarea y actualmente constituye un espacio de discusión entre la academia y los funcionarios públicos. Consolidar este vínculo academia-gobierno es seguramente una de las acciones más importantes de adaptación que la ciudad puede realizar para enfrentar el cambio climático.

Referencias

- Ackerman F. 2008. Critique of cost-benefit analysis, and alternative approaches to decision-making. A report to friends of the Earth England, Wales and Northern Ireland. Disponible en http://www.ase.tufts.edu/gdae/Pubs/rp/Ack_UK_CBACritique.pdf
- Alaton P., Djehiche B. y Stillberger D. 2002. On modelling and pricing weather derivatives. *Applied Mathematical Finance* 9(1):1-20.
- Anderson E. 2006. Potential impacts of climate change on \$2-a-day poverty and child mortality in Sub-Saharan Africa and South Asia. Mimeo, Overseas Development Institute.
- Boltvinik J. y Estévez J. 2002. *Mapa de estratificación social e inadecuación ambiental de la zona metropolitana de la Ciudad de México. Distrito Federal y municipios conurbados del Estado de México*. Informe final elaborado para la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal.
- Cárdenas Rodríguez O.J. y Luna López F.J. 2006. Estimación del tiempo de salida de la pobreza: una aplicación a los diez municipios más marginados de México. *Estudios Económicos* 21(1): 45-54.
- Cline W.R. 1992. *The Economics of Global Warming*. Washington, DC: Institute for International Economics.
- Conde C., Estrada F., Martínez B., Sánchez O. y Gay C. 2010. Regional climate change scenarios for México. *Atmósfera*, en prensa.
- Dasgupta P., Mäler K.G. y Barrett S. 1999. Intergenerational equity, social discount rates, and global warming. En *Discounting and Intergenerational Equity* (P.R. Portney y J.P. Weyant, eds.). Washington, DC: Resources for the Future.
- Datt G. 1998. Computational tools for poverty measurement and analysis. Food Consumption and Nutrition Division, International Food Policy Research Institute.
- Davidson M.D. 2006. A social discount rate for climate damage to future generations based on regulatory law. *Climatic Change*, 76(1-2): 55-72.
- Estrada F., Gay C. y 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.
- Estrada F. 2009. Elaboración de escenarios de cambio climático: selección y justificación de escenarios de emisiones. CEPAL/DFID. Informe Final.
- Estrada F., Martínez-Arroyo A., Fernández-Eguiarte A., Luyando E. y Gay C. 2009b. Defining climate zones in Mexico City using multivariate analysis. *Atmósfera* 22(2): 175-193.
- Estrada F., Martínez B. y Gay C. 2010. A high spatial resolution stochastic integrated assessment model. Artículo en preparación.
- Fankhauser S. 1995. *Valuing Climate Change: the Economics of the Greenhouse*. Londres: EarthScan.
- Fankhauser S. y Tol R.S.J. 2005. On climate change and economic growth. *Resource and Energy Economics* 27(1): 1-17
- Gay C. y Estrada F. 2010. Objective probabilities about future climate are a matter of opinion. *Climatic Change* 99(1-2): 27-46.
- GFDRR. 2009. Integrating disaster risk reduction into the fight against poverty: GFDRR annual report 2009. Global Facility for Disaster Risk Reduction and Recovery, The World Bank, UN. International Strategy for Disaster Risk Reduction (UN/ISDR).
- Golan A., Judge G.G. y Miller D. 1996. *Maximum Entropy Econometrics: Robust Estimation with Limited Data*. Chichester: John Wiley and Sons.

- Grübler A., O'Neill B., Riahi K., Chirkov V., Goujon A., Kolp P., Prommer I., Scherbov S. y Slentoe E. 2007. Regional, national, and spatially explicit scenarios of demographic and economic change based on SRES. *Technological Forecasting and Social Change* 74(7): 980-1029.
- Hope C.W. 2006. The Marginal Impact of CO₂ from PAGE2002: an Integrated Assessment Model Incorporating the IPCC's Five Reasons for Concern. *Integrated Assessment Journal* 6(1): 19-56.
- IPCC-WGII, 2007. *Climate Change 2007: Impact, Adaptation and Vulnerability. Contribution of the Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden y C.E. Hanson, eds.) Cambridge y Nueva York: Cambridge University Press.
- Jáuregui E. 1991. Effects of revegetation and new artificial water bodies on the climate of northeast Mexico City. *Energy and Buildings* 15(3-4): 447-455.
- Jáuregui E. y Tejeda A. 2004. Cuatro décadas de climatología urbana en México. En *Estudios de Arquitectura Bioclimática VI*. Ciudad de México: UAM Iztapalapa, Limusa.
- Jaynes E.T. 1957. Information theory and statistical mechanics. *The Physical Review* 106(4): 620-630.
- Jaynes E.T. 1962. Information theory and statistical mechanics. En *Theoretical Physics III: Brandeis University Summer Institute Lectures* (K.W. Ford, ed.). Nueva York: Benjamin.
- Jaynes E.T. 2003. *Probability Theory: the Logic of Science*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Jefferson M. 1983. Economic uncertainty and business decision-making. En *Beyond Positive Economics?* (J. Wiseman, ed.). Londres: Macmillan.
- Jewson S. y Brix A. 2005. *Weather Derivative Valuation: the Meteorological, Statistical, Financial and Mathematical Foundations*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Lutz W. (ed.) 1996. *The Future Population of the World: What can We Assume Today?* 2ª ed. Londres: Earthscan.
- Martínez-Alier J. y Roca J. 2001. *Economía Ecológica y Política Ambiental*. Ciudad de México: Fondo de Cultura Económica.
- Martínez-Arroyo A. y Jáuregui E. 2000. On the environmental role of urban lakes in Mexico City. *Urban Ecosystems* 4(2): 145-166.
- Martín-Vide J., Moreno M.C. y Esteban P. 2003. Spatial differences in the urban heat island of the pre- and post-Olympic Barcelona (Spain). Fifth conference on Urban Climate. Lodz, Polonia. Cartel.
- Mendelsohn R.O., Morrison W.N., Schlesinger M.E. y Andronova N.G. 2000. Country-specific market impacts of climate change. *Climatic Change* 45(3-4): 553-69.
- Nakicenovic N. y Swart R. (eds.) 2000. *Special Report on Emissions Scenarios. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Nordhaus W.D. 1991. A sketch of the economics of the greenhouse effect. *American Economic Review* 81(2): 146-50.
- Nordhaus W.D. 2006. Geography and macroeconomics: new data and new findings. *Proceedings of the National Academy of Science* 103(10): 3510-17.
- Nordhaus W.D. y Boyer M. 2000. *Warming the World: Economic Models of Global Warming*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press.
- Oke T.R. 1973. City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment* 7(8): 769-779.

- Parry M.L., Rosenzweig C., Iglesias A., Livermore M. y Fischer G. 2004. Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenarios. *Global Environmental Change* 14(1): 53-67.
- Parson E.A. y Fisher-Vanden K. 1995. *Searching for Integrated Assessment: a Preliminary Investigation of Methods, Models, and Projects in the Integrated Assessment of Global Climatic Change*. Consortium for International Earth Science Information Network (CIESIN). University Center, Mich.
<http://sedac.ciesin.columbia.edu/mva/iamcc.tg/mva-questions.html>
- PNUD. 2005. Índice de desarrollo humano municipal en México 2000-2005. Disponible en: [http://www.cinu.org.mx/prensa/especiales/2008/IDH/IDH_Municipal_en_Mexico_2000-2005\[1\].pdf](http://www.cinu.org.mx/prensa/especiales/2008/IDH/IDH_Municipal_en_Mexico_2000-2005[1].pdf)
- Posner R. 2004. *Risk and Response*. Nueva York: Oxford University Press.
- Schneider S.H., 2003. Imaginable Surprise. En *Handbook of Weather, Climate and Water: Atmospheric Chemistry, Hydrology, and Societal Impacts* (T.D. Potter y B. Colman, eds.). Hoboken: Wiley-Interscience.
- Schwartz P. 1991. *The Art of the Longview: Three global scenarios to 2005*. Nueva York: Doubleday.
- SHCP y SEMARNAT. 2009. *La Economía del Cambio Climático en México*. Ciudad de México: Secretaría de Hacienda y Crédito Público y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Stern N.H. 2006. *The Economics of Climate Change: the Stern Review*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Swiss Re. 2002. *Opportunities and Risks of Climate Change*. Zurich: Swiss Re Insurance Company.
- Tejeda-Martínez A. y Jáuregui-Ostos E. 2005. Surface energy balance measurements in the Mexico City region: a review. *Atmósfera* 18(1): 1-23.
- Tol R.S.J. 1995. The damage costs of climate change toward more comprehensive calculations. *Environmental and Resource Economics* 5(4): 353-74.
- Tol R.S.J. 2002a. Estimates of the damage costs of climate change. Part 1: Benchmark estimates. *Environmental and Resource Economics* 21(1): 47-73.
- Tol R.S.J. 2002b. Estimates of the damage costs of climate change. Part 2: Dynamic estimates., 21(1): 135-160.
- Tol R.S.J. 2009. The economic effects of climate change. *Journal of Economic Perspectives* 23(2): 29-51.
- Torok S., Morris C., Skinner C. y Plummer N. 2001. Urban heat island features of southeast *Australian towns*. *Australian Meteorological Magazine* 50(1): 1-13.
- Van den Bergh J. 2009. Safe climate policy is affordable: twelve reasons. *Climatic Change* 101(3-4): 339-385.

Glosario

Adaptación

Ajuste de los sistemas humanos o naturales frente a entornos nuevos o cambiantes. La adaptación al *cambio climático* se refiere a los ajustes en sistemas humanos o naturales como respuesta a estímulos climáticos proyectados o reales, o sus efectos, que pueden moderar el daño o aprovechar sus aspectos beneficiosos. Se pueden distinguir varios tipos de adaptación, como la preventiva y la reactiva, la pública y privada, o la autónoma y la planificada (IPCC, 2007).

Cambio climático

Importante variación estadística en el estado medio del *clima* o en su variabilidad, que persiste durante un periodo prolongado, normalmente de decenios o incluso más. El cambio climático se puede deber a procesos naturales internos o a cambios del forzamiento externo, o bien a cambios antrópicos persistentes en la composición de la atmósfera o en el uso de las tierras. La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMCC), en su Artículo 1 define ‘cambio climático’ como “un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos comparables”. La CMCC distingue entre ‘cambio climático’ atribuido a actividades humanas que alteran la composición atmosférica y ‘variabilidad climática’ atribuida a causas naturales (IPCC, 2007).

Clima

En sentido estricto, se define como ‘estado medio del tiempo’ o, más rigurosamente, como una descripción estadística del tiempo en términos de valores medios y variabilidad de las cantidades pertinentes durante periodos que pueden ser de meses a miles o millones de años. El periodo normal es de treinta años, según la definición de la Organización Meteorológica Mundial (OMM). Las cantidades aludidas son casi siempre variables de la superficie (temperatura, precipitación o viento, entre otras), aunque en un sentido más amplio el ‘clima’ es una descripción (incluso estadística) del estado del sistema climático (IPCC, 2007).

CVCCCM

Centro Virtual de Cambio Climático de la Ciudad de México.

Escenario climático

Representación plausible y a menudo simplificada del clima futuro, basada en un conjunto internamente coherente de relaciones climatológicas; se construye para ser utilizado de forma explícita en la investigación de las consecuencias potenciales del cambio climático antrópico. Las proyecciones climáticas sirven a menudo como materia prima para la construcción de escenarios climáticos y sus posibles impactos, pero los escenarios climáticos requieren información adicional, por ejemplo, acerca del clima observado en un momento determinado. Un ‘escenario de cambio climático’ es la diferencia entre un escenario climático y el clima actual (IPCC, 2007).

Escenario

Descripción plausible y a menudo simplificada de la evolución de un fenómeno a futuro, basada en un conjunto coherente e internamente consistente de hipótesis sobre fuerzas impulsoras fundamentales (ritmo del avance de la tecnología y precios) y las relaciones entre dichos factores. Los escenarios no son predicciones ni pronósticos y, a veces, pueden estar basados en un ‘guión narrativo’. Los escenarios pueden derivar de proyecciones, pero a menudo están basados en información adicional de otras fuentes (IPCC, 2007).

Escenario de emisiones

Representación plausible de la evolución futura de las emisiones de sustancias que son, en potencia, radiativamente activas (*GEI* o aerosoles). Se basa en un conjunto de hipótesis coherentes e internamente consistentes sobre las fuerzas impulsoras de este fenómeno (como el desarrollo demográfico y socioeconómico, y el cambio tecnológico) y sus relaciones clave. Los escenarios de concentraciones, derivados a partir de los escenarios de emisiones, se utilizan como insumos en una simulación climática para calcular proyecciones climáticas (IPCC, 2007).

Estabilización

Fijación de las concentraciones atmosféricas de uno o más *GEI* (por ejemplo, el dióxido de carbono o una cesta de *GEI* de CO₂ equivalente) en un nivel determinado (IPCC, 2007).

Evaluación de los impactos (climáticos)

Práctica para la identificación y evaluación de las consecuencias negativas y positivas del cambio climático en sistemas humanos y naturales (IPCC, 2007).

Evaluación integrada

Método de análisis que integra los resultados y las simulaciones de las ciencias físicas, biológicas, económicas y sociales, así como las interacciones entre estos componentes, en un marco coherente a fin de proyectar las consecuencias del cambio ambiental y las respuestas de política a dicho cambio (IPCC, 2007).

Gas de efecto invernadero

Gases integrantes de la atmósfera, de origen natural y antrópico, que absorben y emiten radiación en determinadas longitudes de onda del espectro infrarrojo. Tanto la superficie de la Tierra como la atmósfera y las nubes absorben y reflejan la radiación solar en los espectros visible e invisible, propiedad que causa el efecto invernadero. Los principales *GEI* en la atmósfera terrestre son vapor de agua (H₂O), dióxido de carbono (CO₂), óxido nitroso (N₂O), metano (CH₄) y ozono (O₃). Existen otros *GEI* producidos exclusivamente por el hombre, como los halocarbonos y otras sustancias que contienen cloro y bromuro, de las que se ocupa el Protocolo de Montreal. Además de CO₂, N₂O y CH₄, el Protocolo de Kyoto aborda otros *GEI*, como el hexafluoruro de azufre (SF₆), los hidrofluorocarbonos (HFC) y los perfluorocarbonos (PFC; IPCC, 2007).

GFDRR

Convención Global para la Reducción de Riesgos del Banco Mundial.

IIASA

Instituto Internacional para el Análisis de Sistemas Aplicados.

Impactos (climáticos)

Consecuencias del *cambio climático* en sistemas humanos y naturales. Según la medida de la *adaptación*, se pueden distinguir impactos potenciales e impactos residuales: 1) Impactos potenciales: todos los impactos que pueden suceder dado un cambio proyectado en el clima, sin tener en cuenta las medidas de *adaptación*; 2) Impactos residuales: los impactos del cambio climático que pueden ocurrir después de la adaptación (IPCC, 2007).

Impactos agregados

Los impactos totales acumulados en sectores y/o regiones. La suma de los impactos requiere de un conocimiento (o hipótesis) sobre la importancia relativa de los impactos en diferentes sectores y regiones. Las medidas de los impactos agregados incluyen, por ejemplo, el número total de personas afectadas, el cambio de productividad primaria neta, el número de sistemas que cambian o los costos económicos totales (IPCC, 2007).

Impactos en el mercado

Efectos vinculados a transacciones comerciales que afectan directamente al *Producto Interno Bruto*, como cambios en el suministro y precio de bienes agrícolas (IPCC, 2007).

Impactos que no afectan el mercado

Impactos que afectan a ecosistemas o al bienestar humano, pero que no están vinculados directamente a transacciones comerciales; por ejemplo, un creciente riesgo de muerte prematura (IPCC, 2007).

IPCC

Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático.

Isla de calor

Zona dentro de un área urbana caracterizada por una temperatura ambiental más alta que las zonas colindantes debido a una absorción de la energía solar por materiales como el asfalto (IPCC, 2007).

Mitigación

Intervención antrópica para reducir las fuentes o mejorar los sumideros de GEI (IPCC, 2007).

Paridad de Poder Adquisitivo (PPP)

Estimación del *Producto Interno Bruto* basada en el poder adquisitivo de las divisas, en vez de los tipos de cambio actuales. Estas estimaciones son una mezcla de cifras extrapoladas y basadas en regresiones, utilizando los resultados del Programa de Comparación Internacional. Las estimaciones de PPP del PIB per cápita tienden a la baja en países industrializados, y al alza en los países en desarrollo (IPCC, 2007).

Producto Interno Bruto (PIB)

Suma del valor añadido bruto, a precios de consumidor, de todos los productores residentes y no residentes en la economía, más los impuestos, y menos las subvenciones no incluidas en el valor de los productos en un país o zona geográfica durante un periodo determinado, normalmente de un año. Se calcula sin deducir la depreciación de los activos fabricados y la degradación y eliminación de recursos naturales. El PIB es a menudo una medida, aunque incompleta, del bienestar (IPCC, 2007).

SEMARNAT

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

SHCP

Secretaría de Hacienda y Crédito Público.

SRES

Reporte Especial sobre Escenarios de Emisiones.

Urbanización

Transformación de la tierra, desde un estado natural o natural gestionado (como la agricultura) en ciudades. Proceso impulsado por la migración neta desde zonas rurales a las ciudades por el que un porcentaje cada vez mayor de la población en cualquier nación o región pasa a vivir en asentamientos definidos como ‘centros urbanos’ (IPCC, 2007).

Vulnerabilidad

Nivel al que un sistema es susceptible o capaz de soportar los efectos adversos del cambio climático, incluyendo la variabilidad climática y los fenómenos extremos. La vulnerabilidad está en función del carácter, magnitud y velocidad de la variación climática al que se encuentra expuesto un sistema, su sensibilidad y su capacidad de adaptación (IPCC, 2007).

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1
Ejemplos de variables socioeconómicas y su resolución espacial disponible
22 - 23t

Figura 2
Escenarios de población para el 2100 de acuerdo con el escenario de emisiones A2r espacialmente explícito del IIASA.
24

Figura 3
Escenario de población para el Distrito Federal durante el periodo 2005-2100, de acuerdo con el escenario de emisiones A2r
25

Figura 4
Proyecciones de población de CONAPO para las dieciséis delegaciones políticas del Distrito Federal en el periodo 2005-2100
26

Figura 5
Escenarios de población por delegación política para el periodo 2005-2100 y el escenario de emisiones A2r
27

Figura 6
Escenarios de densidad de población por delegación política, bajo el escenario A2r para el periodo 2005-2100
28

Figura 7
Producto Interno Bruto del Distrito Federal bajo el escenario de emisiones A2r, para el periodo 2006-2100
32

Figura 8
Tasas de crecimiento del PIB por delegación política del Distrito Federal, de acuerdo con el escenario de emisiones A2r
34

Figura 9
Escenarios de PIB por delegación del Distrito Federal para el periodo 2006-2100, de acuerdo con el escenario de emisiones A2r
35

Figura 10
Escenarios de PIB per cápita por delegación del Distrito Federal para el periodo 2006-2100, de acuerdo con el escenario de emisiones A2r
36

Figura 11
Diferencias observadas y proyectadas de ingreso per cápita por delegación respecto al ingreso per cápita promedio del Distrito Federal en el 2006 y 2100, de acuerdo con el escenario de emisiones A2r
37

Figura 12
Ejemplo de algunas de las salidas del Modelo de Evaluación Integrada del CCA
41

Figura 13
Estimaciones de los costos potenciales del cambio climático para México, bajo el escenario de emisiones A2r
42

Figura 14
Efecto de la isla de calor sobre las temperaturas anuales en las delegaciones del Distrito Federal, de acuerdo con el escenario A2r
48

Figura 15
Interfaz en MATLAB del modelo estocástico M-CCA/UNAM
52

Figura 16

Histogramas de los incrementos en la temperatura media anual simulados para la delegación Cuauhtémoc, para el año 2100

55

Figura 17

Evolución del PIB del Distrito Federal durante el periodo 2001-2100

58

Figura 18

Costos acumulados respecto al PIB delegacional actual, bajo el escenario de inacción y bajo el escenario de estabilización a 350 ppm

59

Figura 19

Evolución del PIB per cápita por delegación para el periodo 2001-2100

60 - 61

Figura 20

Evolución del número de personas adicionales en situación de pobreza por el cambio climático en el 2100, bajo el escenario de emisiones A2 (inacción) y un escenario de estabilización en 350 ppm

63

Figura 21

Impactos potenciales del cambio climático en la economía del Distrito Federal por grado centígrado de incremento en la temperatura global

69

Figura 22

Número de personas adicionales que se encontrarían en situación de pobreza en el Distrito Federal por grado centígrado de incremento en la temperatura global

70

