

2009

Modelos Integrales de Economía y Cambio Climático

La ruta de México hacia una economía sustentable de alta
eficiencia energética y baja intensidad de carbón

4° REPORTE

ARQUITECTURA DE
DISEÑO, FUNCIONES Y
APLICACIONES POSIBLES
DE UN MODELO GLOBAL
DEFINICIÓN DE POLÍTICAS
Y MEDIDAS PARA EL
DESARROLLO DE
ENERGÍAS RENOVABLES Y
DE BAJA EMISIÓN DE
CARBONO EN MÉXICO



Folio No. 001

Contrato Número SE-S 03/2009

Preparado por:

**CENTRO MARIO MOLINA
para Estudios Estratégicos Sobre Energía y Medio Ambiente A.C.**

**Dr. Mario Molina
Presidente**

**Ing. Carlos Mena Brito
Director Ejecutivo**

**M. en C. Rodolfo Lacy Tamayo
Coordinador de Programas y Proyectos**

**Dra. María Eugenia Ibararán
Consultora**

**M. en C. Claudia Octaviano Villasana
Consultora**

**Erika Ortiz Sánchez
Economista**

ÍNDICE

LISTADO DE ACRÓNIMOS	6
RESUMEN EJECUTIVO	8
1. INTRODUCCIÓN	14
2. ASPECTOS GENERALES DE LOS MODELOS INTEGRALES DE ECONOMÍA Y CAMBIO CLIMÁTICO	16
3. MODELOS CLIMÁTICOS DEL CUARTO REPORTE DE EVALUACIÓN DEL IPCC	21
3.1. El Clima y el Sistema Climático.....	21
3.2. Componentes de los Modelos Climáticos	23
3.3. Modelos de Circulación General Atmosférica-Oceanográfica (MCGAOs)	25
3.4. Modelos del Sistema Terrestre de Complejidad Intermedia (MTCIs)	29
3.5. Modelos Climáticos Simples (MCSs)	31
4. MODELOS GLOBALES PARA EVALUAR ESCENARIOS ALTERNOS DE DESARROLLO ECONÓMICO, ENERGÉTICO Y DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO.....	33
4.1. Supuestos socioeconómicos para evaluación de escenarios de emisiones	34
4.2. Modelos utilizados por el IPCC para Escenarios de Emisiones.....	41
4.2.1. Modelo AIM (Asian Pacific Integrated Model).....	41
4.2.2. Modelo ASF (The Atmospheric Stabilization Framework model)	43
4.2.3. Modelo IMAGE (Integrated Model to Assess the Greenhouse Effect)	44
4.2.4. Modelo MESSAGE (Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact).....	46
4.2.5. Modelo MARIA (Multiregional Approach for Resource and Industry Allocation Model)	48
4.2.6. Modelo Mini CAM (Mini Climate Assessment Model)	49
4.3. Foros Internacionales de análisis de modelos para la actualización de los Escenarios de Emisiones del IPCC	50
4.3.1. Resultados del Foro de Modelación Energética	51
4.3.2. Resultados Foro de análisis de incorporación de la innovación tecnológica en los modelos de economía y cambio climático	55
4.3.3. Grupo de Trabajo responsable de la elaboración de los nuevos escenarios hacia el quinto informe del ipcc.....	57
5. MODELOS PARA EVALUAR POLÍTICAS NACIONALES Y REGIONALES DE MITIGACIÓN EN ESTUDIOS SELECCIONADOS.....	61
5.1. Clasificación de Modelos Económicos adaptados para evaluar políticas de mitigación.....	64

5.2.	Modelos “top-down”	65
5.3.	Modelos “bottom-up” para el sector energía.....	66
5.4.	Modelos híbridos	67
6.	MODELO INTEGRADO DEL SISTEMA GLOBAL DEL MIT (IGSM)	69
6.1.	El componente económico.....	70
6.2.	El componente del clima y el funcionamiento del sistema terrestre.....	71
6.3.	El componente del ecosistema y la cobertura terrestre.....	73
6.4.	Selección del modelo.....	74
7.	APLICACIONES POSIBLES DEL MODELO IGSM-EPPA EN POLÍTICAS PÚBLICAS DE MEXICO SOBRE CAMBIO CLIMÁTICO	76
7.1.	Modelación Integral para evaluar el Programa Especial de Cambio Climático y la meta aspiracional de México de reducir emisiones al 50% en el 2050 con respecto al año 2000	77
7.2.	Modelación para diseñar una política de mitigación de GEI conjunta de América del Norte	87
7.3.	Modelación de implicaciones económicas para México de alternativas de acuerdos internacionales para el esquema de mitigación post-Kioto.....	93
8.	ANEXOS.....	98
9.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	109

LISTADO DE ACRÓNIMOS

AIM	Modelo Integrado de Asia-Pacífico (<i>Asian Pacific Integrated Model</i>)
AOS	Sistema de interacción Atmósfera-Océano (<i>Atmosphere-Ocean System</i>)
AR4	Cuarto Informe de Evaluación del Cambio Climático (<i>Fourth Assessment Report</i>)
ASF	Modelo Marco de Estabilización Atmosférica (<i>Atmospheric Stabilization Framework Model</i>)
CCCMA	Centro Canadiense de Modelación y Análisis Climatológico (<i>Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis</i>)
CCM	Modelo Comunitario Climático (<i>Community Climate Model</i>)
CCS	Captura y secuestro geológico de carbono (Carbon Capture and Storage)
CCSM	Modelo Comunitario del Sistema Climático (<i>Community Climate System Model</i>)
CES	Elasticidades de sustitución constantes (<i>constant elasticity of substitution</i>)
CFE	Comisión Federal de Electricidad
CGCM3	Modelo Climático Acoplado de Tercera Generación Canadiense (<i>Canadian Coupled Global Climate Model versión 3</i>)
CGE	Equilibrio General Computable (<i>Computable General Equilibrium</i>)
CM	Modelos climáticos (<i>Climate Models</i>)
CO	Monóxido de carbono
CO₂	Bióxido de Carbono
CSM	Modelo del Sistema Climatológico
CH₄	Metano
DICE	Modelo Dinámico de Cambio Climático y Economía (<i>Dynamic Integrated Climate-Economy Model</i>)
EIS	Sistema de Energía e Industria (<i>Energy and Industry System</i>)
EMF	Foro de Modelación Energética (<i>Energy Modelling Forum</i>)
EPA	Agencia de Protección Ambiental (<i>Environmental Protection Agency</i>)
EPPA	Modelo de Predicciones de Emisiones y Análisis de Políticas (<i>Emissions Prediction and Policy Analysis</i>)
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GFDL	Laboratorio de Dinámica de Fluidos Geofísicos (<i>Geophysical Fluids Dynamics Laboratory</i>)
HadCM	Modelo Climático del Centro Hadley (<i>Hadley Centre Climate Model</i>)
HFC	HidroFluoroCarbono

IAM	Modelos de valoración integrada (<i>Integrated Assessment Models</i>)
IAMC	Consortio de Modelación de Valoración Integrada (<i>Integrated Assessment Modeling Consortium</i>)
IAV	Modelos de impactos, adaptación y vulnerabilidad (<i>Impacts Adaptation and Vulnerability</i>)
IIASA	Instituto Internacional de Análisis de Sistemas Aplicados (<i>International Institute of Applied Systems Analysis</i>)
IMAGE-WorldScan	Modelo Integrado de Valoración del Efecto Invernadero (<i>Integrated Model to Assess the Greenhouse Effect</i>)
IMCP	Proyecto Comparativo de Modelación de la Innovación (<i>Innovation Modelling Comparison Project</i>)
IPAC	Modelo de Valoración Integrada para China (<i>Integrated Policy Assessment Model for China</i>)
IPCC	Panel Intergubernamental de Cambio Climático (<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>)
IGSM-EPPA	Modelo Integrado del Sistema Global- Predicción de Emisiones y Análisis de Políticas (<i>Integrated Global System Model- Emissions Prediction and Policy Analysis</i>)
LbD	Aprender haciendo (<i>learning by doing</i>)
MARIA	Modelo multiregional para la asignación de recursos e industria (<i>Multiregional Approach for Resource and Industry Allocation</i>)
MCGAOs	Modelos acoplados de Circulación General Atmosférica-Oceanográfica
MCS	Modelos Climáticos Simples
MDL	Mecanismo de Desarrollo Limpio
MESSAGE	Modelo para Estrategias Alternas de Oferta de Energía y su Impacto Ambiental (<i>Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact</i>)
MiniCAM	Modelo mini climático de Valoración (<i>Mini Climate Assessment Model</i>)
MIT	Instituto Tecnológico de Massachusetts (<i>Massachusetts Institute of Technology</i>)
MTCI	Modelos del Sistema Terrestre de Complejidad Intermedia
N₂O	Óxido nitroso
NAICS	North American Industrial Classification System
NARCCAP	Programa Regional Norte Americano de Evaluación del Cambio Climático (<i>North American Regional Climate Change Assessment Program</i>)
NCAR	Centro Nacional de Investigación Atmosférica (<i>National Center for Atmospheric Research</i>)
NF3	Trifluoruro de nitrógeno

NH₃	Amoniaco
NO_x	Óxidos de nitrógeno
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico
PCMDI	Programa de Diagnóstico y Comparabilidad de Modelos de Clima (<i>Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison</i>)
PECC	Programa Especial de Cambio Climático
PEMEX	Petróleos Mexicanos
PFC	Flouorcarbonos
PIB	Producto Interno Bruto
PNNL	Laboratorio Nacional del Noroeste del Pacífico (<i>Pacific Northwest National Laboratory</i>)
SENER	Secretaría de Energía
SF₆	Hexafluoruro de azufre
SO₂	Dióxido de azufre
SRES	Reporte Especial sobre Escenarios de emisiones del IPCC (<i>Special Report on Emissions Scenarios</i>)
TES	Sistema de Medio Ambiente Terrestre
TIMER	Modelo sobre Objetivos Regionales Energéticos (<i>Targets Image Energy Regional</i>)
TLCAN	Tratado de Libre Comercio de América del Norte
UNFCCC	Convención Marco contra el Cambio Climático (<i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i>)
USAID	Agencia de Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (<i>United States Agency for International Development</i>)
USDA	Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (<i>United States Department of Agriculture</i>)
VOC	Compuestos orgánicos volátiles

RESUMEN EJECUTIVO

El presente documento constituye la última parte del estudio Modelos Integrales de Economía y Cambio Climático, la ruta de México hacia una economía de baja intensidad de carbón cuyo objetivo fundamental es establecer las metodologías para que la Secretaría de Energía pueda diseñar la política energética que impulse el desarrollo sustentable del sector, ante los retos y oportunidades que se presentan en el entorno nacional e internacional a la luz del fenómeno del cambio climático.

La propuesta de arquitectura modelística que se presenta a continuación se deriva de una revisión amplia de los modelos disponibles a nivel internacional. Incluye una revisión de los modelos climáticos más relevantes y una revisión de los modelos integrados de economía y cambio climático utilizados por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) en la elaboración de escenarios de emisiones globales. El objetivo de esta revisión es que el modelo seleccionado permita introducir a México a la modelación económica, energética y ambiental más avanzada en el mundo.

El capítulo 1 introduce el tema considerando el contexto internacional y la relevancia para México de participar activamente en las negociaciones internacionales en materia de cambio climático. El capítulo 2 revisa los aspectos generales de los modelos integrales de economía y cambio climático, precisando cual es la interrelación de los modelos climáticos con los modelos económicos, e identifica la necesidad de contar con modelos nacionales que proporcionen información más precisa de los impactos, costos y beneficios para el país.

El capítulo 3 discute las principales características de los modelos climáticos. Dichos modelos se clasifican de acuerdo al grado de complejidad introducido en la modelación de los sistemas naturales que determinan el clima. Se agrupan en tres grandes categorías: Modelos de Circulación Global Atmosférica-Oceanográfica (MCGAOs) que son los de mayor complejidad, los Modelos del Sistema Terrestre de Complejidad Intermedia (MTCIs) y los Modelos Climatológicos Simples (MCSs). En este documento se presenta la gama de modelos más importantes en cada una de las categorías. Existe una gran cantidad de modelos de creciente complejidad; los resultados presentados por el IPCC son resultado de esfuerzos coordinados de catorce grupos de ejecución de modelos MCGAO, de 10 países diferentes usando 23 modelos.

La conclusión contundente a que llegan los expertos en modelación del sistema climático, presentada por el IPCC en su Cuarto Informe, es que el calentamiento del sistema climático es inequívoco, como evidencian los aumentos observados del promedio mundial de la temperatura del aire y del océano, el deshielo generalizado de nieves y hielos, y el aumento del promedio mundial del nivel del mar. La ciencia del cambio climático también ha permitido concluir que dado el aumento de las emisiones mundiales de GEI (gases de efecto invernadero) por efecto de actividades humanas desde la era preindustrial, se puede aseverar que muy probablemente la mayor parte del aumento observado del promedio mundial de temperatura desde mediados del siglo XX se debe al aumento observado de las concentraciones de GEI antropogénicas.

Los científicos han podido constatar que los sistemas naturales están siendo afectados por cambios del clima regional, particularmente por un aumento de la temperatura. Los datos presentados por el IPCC muestran que la tendencia lineal del calentamiento de los últimos 50 años (0.13°C [0.10°C a 0.16°C] por decenio) casi duplica la de los últimos 100 años. El aumento total de la temperatura de 1850–1899 hasta 2001–2005 es 0.76°C [0.57°C a 0.95°C]. Durante los últimos 50 años, se han observado cambios generalizados en las temperaturas extremas.

Por lo que hace a los patrones de precipitación, se han observado cambios en las tendencias a largo plazo, de 1900 a 2005, en la cantidad de las precipitaciones en diversas regiones del mundo. Asimismo, se han observado sequías más prolongadas y más intensas en áreas más extensas desde el decenio de 1970, particularmente en los trópicos y los subtrópicos. La frecuencia de fenómenos de precipitaciones fuertes se ha incrementado en la mayoría de las áreas terrestres, en concordancia con el calentamiento y los aumentos observados del vapor de agua atmosférico.

La modelación del sistema climático ha permitido realizar análisis prospectivos de los cambios globales que se experimentarían en las principales variables de no tomarse medidas para la mitigación. Para ello han utilizado los escenarios de emisiones provenientes de los modelos económicos a fin de proyectar el comportamiento esperado del clima durante el siglo XXI. Los márgenes de variación probables del calentamiento medio del aire en superficie se estimaron para escenarios que describen distintos posibles cursos de la economía mundial. La modelación de estos escenarios permite concluir que aun en el escenario bajo (denominado B1) se puede esperar para el 2100 una variación probable de 1.8°C (el rango de incertidumbre es de 1.1°C a 2.9°C) y que en un escenario de altas emisiones (denominado A1FI) la variación esperada es de 4.0°C (el rango de incertidumbre es de 2.4°C a 6.4°C).

Como se puede observar, los rangos de incertidumbres son significativos. En el escenario alto (A1FI) el límite superior del rango de incertidumbre señala que el globo terrestre podría experimentar cambios incluso mayores a los 6°C . La comunidad científica concuerda en que estos niveles representarían niveles peligrosos al implicar cambios irreversibles en los sistemas naturales, por lo que la modelación del clima ha derivado en conclusiones críticas para la política mundial de mitigación, y sobre la necesidad de una política de adaptación al cambio climático inercial inducido por las emisiones pasadas.

Los modelos globales proporcionan información alarmante para México. Gran parte del territorio nacional se encuentra en regiones en las que se pronostican las mayores variaciones de temperatura reportadas en los modelos globales. Se espera asimismo cambios fundamentales en los patrones de precipitación. Sin embargo, a la fecha, no se han realizado en México estudios con modelos de la escala necesaria para evaluar los impactos climáticos con una mayor resolución en las distintas regiones del país. La vulnerabilidad de México es clara, sin embargo, se requiere de modelos climáticos detallados que brinden información para que el país pueda evaluar sus regiones vulnerables y establecer los programas de adaptación al cambio climático necesarios con mejor información sobre los impactos en los sistemas naturales.

El avance científico en la modelación del clima ha derivado en una creciente preocupación a nivel internacional para atender dicho problema y ha impulsado el desarrollo de modelos económicos específicos que permitan evaluar por un lado las emisiones que se esperan

en el futuro así como los costos de la mitigación y adaptación al cambio climático. El capítulo 4 presenta los modelos globales de economía y cambio climático utilizados para evaluar escenarios alternos de desarrollo económico, energético y de emisiones de gases de efecto invernadero. Dichos modelos permiten realizar estimaciones de los costos económicos de reducir las emisiones para lograr la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera.

El documento presenta las características y estructura de los seis modelos utilizados por el IPCC en su Informe Especial de Escenarios de Emisiones (SRES). Los modelos son: AIM y MARIA desarrollados en Japón, el ASF y el MiniCAM desarrollados en los Estados Unidos, y el IMAGE-WorldScan y el MESSAGE desarrollados en Holanda y Austria, respectivamente. Dichos modelos fueron seleccionados en el año 2000 por el IPCC para la construcción de los escenarios alternos de desarrollo económico y de las emisiones asociadas a distintas rutas de la economía mundial, porque representaban los enfoques modelísticos más relevantes a nivel internacional, incluyendo tanto las modelaciones macroeconómicas con enfoques multisectoriales denominados “top-down” como las modelaciones microeconómicas con análisis detallados del sector energía en países relevantes.

Los resultados de las modelaciones del IPCC representan las trayectorias de emisiones que se pueden esperar con distintos supuestos sobre el futuro de la población mundial, el comportamiento de la economía global y su grado de convergencia, y sobre el avance tecnológico. Existen 40 escenarios de emisiones, provenientes de los modelos y de distintos supuestos socioeconómicos definidos por el IPCC para la modelación. Las emisiones acumulativas totales de carbono emitidas por todas las fuentes hasta 2100 se estiman en el orden de entre 770 GtC y 2540 GtC, aproximadamente. Estos escenarios difieren por los supuestos socioeconómicos subyacentes en su estimación y no consideran políticas específicas de mitigación de emisiones de GEI, es decir son el escenario base para las políticas de mitigación.

En términos generales, el límite inferior representaría un mundo de rápido avance tecnológico, una estabilización de la población mundial que alcanza un máximo a mitad del siglo, un alto crecimiento económico pero con un rápido cambio estructural hacia una economía de la información y de servicios. El escenario bajo también implica un avance en la cooperación internacional para lograr soluciones globales económicas, sociales y ambientales, lo que resulta en una mejora en la equidad y desacoplamiento de las emisiones por las fuerzas del mercado.

En contrapartida, las emisiones altas corresponden a un mundo que considera una economía mundial más heterogénea, con mayor fragmentación y regionalización, y con una importante participación de los combustibles fósiles en la generación de energía. Evidentemente, los escenarios intermedios representan distintas combinaciones de aumento en la población, crecimiento económico y desarrollo tecnológico. El IPCC decidió no asociar probabilidades de ocurrencia a ninguno de los escenarios por lo que todos se consideran igualmente válidos.

Los escenarios de emisiones fueron elaborados en el año 2000, por lo que este documento presenta los progresos en la modelación económica del cambio climático más relevantes en la última década, identificados por el IPCC en su Cuarto Informe. De forma relevante, se discuten los resultados del Foro de Modelación Energética y del Foro de

Modelación de la Innovación Tecnológica, auspiciados por la Universidad de Stanford y Cambridge, respectivamente. Los resultados más relevantes se refieren a los escenarios de estabilización atmosférica post-SRES que ya consideran el análisis de políticas de mitigación con estrategias de mitigación de múltiples gases y sectores y nuevos enfoques para incorporar el análisis del cambio tecnológico en la modelación económica. El IPCC ha iniciado la coordinación de los esfuerzos para la elaboración de nuevos escenarios por lo que se discuten en este documento los avances en dichos trabajos hacia el Quinto Informe del IPCC.

México no ha participado en los grupos científicos que desarrollan los escenarios de emisiones. La revisión de modelos muestra que la economía mexicana ha sido prácticamente agrupada dentro del bloque denominado “Resto del mundo” o “Latinoamérica” por lo que los modelos hasta este momento han considerado únicamente las variables macroeconómicas más elementales como el PIB, las emisiones y la población del país. Evidentemente, estos resultados no representan adecuadamente a México por lo que los costos globales de mitigación estimados están lejos de considerar las características, por ejemplo, de mercados como los que se tienen en el sector energía del país.

El capítulo 5 describe las características de modelos utilizados para evaluar políticas nacionales y regionales de mitigación en otros países. Derivado de los modelos globales, algunos países han adaptado dichos modelos o desarrollado modelos específicos para evaluar sus políticas de mitigación. Las características principales de estos modelos se describen en este capítulo a fin de permitir un mejor entendimiento del modelo seleccionado para México y su comparación con otros modelos. En este capítulo en particular, se destacan las fortalezas de los modelos de equilibrio general computable (CGE) por su capacidad de analizar las políticas climáticas y sus implicaciones nacionales en precios, y en la oferta y demanda de múltiples sectores en la economía.

El capítulo 6 describe el modelo seleccionado. La arquitectura del modelo global IGSM-EPPA se considera la mejor para México, ya que incorpora el estado del arte en la ciencia tanto en la modelación climática como en la económica. Dicho modelo fue desarrollado por el Massachusetts Institute of Technology (MIT) y es reconocido como uno de los más robustos a nivel internacional. El capítulo describe los criterios de selección así como los principales componentes del modelo seleccionado. El IGSM-EPPA se integra por dos sistemas el Modelo Integrado del Sistema Global (IGSM) y el Modelo de Predicciones de Emisiones y Análisis de Políticas (EPPA). Cuenta con componentes que simulan el clima, el cambio tecnológico, la economía y las políticas públicas. El EPPA es un modelo de equilibrio general computable, multisectorial y multiregional.

Finalmente, el capítulo 7 contiene las propuestas de políticas para el cambio climático que pueden ser analizadas utilizando el modelo. El modelo IGSM-EPPA ha sido utilizado en Estados Unidos, Europa, Japón, Corea, India y China, para evaluar políticas climáticas. Se describen algunos resultados relevantes de los estudios realizados con el modelo en dichos países, con el fin de ilustrar las potencialidades de este modelo para proporcionar la información que el país requiere para el desarrollo de su política de energía y medio ambiente, en un contexto de restricciones climáticas.

El capítulo describe las simulaciones sugeridas en las que se incluye el análisis de las políticas en tres grandes bloques: a) Análisis de las implicaciones macroeconómicas del

Programa Especial de Cambio Climático de México y la propuesta del Gobierno Federal de reducción emisiones al 50%, b) Análisis de una política ambiental conjunta de América del Norte para la mitigación de emisiones, particularmente por lo que se refiere al análisis de las implicaciones económicas de la propuesta de Ley denominada *The American Clean Energy and Security Act of 2009* en los Estados Unidos, y c) Análisis de implicaciones económicas para México de alternativas de acuerdos internacionales para el esquema de mitigación post-Kioto, considerando una política común para los países de nivel de ingreso medio y con un nivel de desarrollo y actividad económica comparable al de México, para negociar como bloque ante la comunidad internacional.

La primera propuesta sobre el componente nacional tiene el potencial de brindar información para el análisis de políticas para fomento de las energías renovables en el sector eléctrico e implicaciones para la participación de energías convencionales y de nuevas tecnologías como CCS, implicaciones para el sector petrolero de políticas climáticas nacionales y regionales, así como algunos análisis para el sector transporte y los biocombustibles.

Se pretende que los resultados de estas simulaciones proporcionen información para que el país fortalezca su papel en las negociaciones internacionales tras los acuerdos que se alcancen en Copenhague y en la próxima COP en México. Asimismo, las modelaciones pueden facilitar al país el análisis de las medidas necesarias para atender los cambios regulatorios de nuevas leyes en materia de cambio climático y energía en Norteamérica, incluso para fomentar el diseño de una política climática regional, así como, brindar los elementos críticos para definir las políticas internas del país atendiendo a los cambios en el entorno internacional.

1. INTRODUCCIÓN

Muchos gobiernos alrededor del mundo están tomando acciones concretas para enfrentar las causas antropogénicas del cambio climático. Los modeladores han estado trabajando en la creación y refinamiento de modelos para a partir de éstos entender mejor las causas, los procesos y los efectos del cambio climático. Así mismo, a partir de estos modelos ha sido posible hacer proyecciones de la tasa a la que crecerán las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), la concentración de éstos en la atmosfera y los efectos físicos que esto implicará para el planeta. Esto permitirá elaborar mejores políticas públicas para enfrentar este problema.

Mientras que muchos países cuentan con modelos que se enfocan al sector energético a nivel nacional, los modelos de circulación global atmosférica han sido desarrollados primordialmente en los países industrializados. Por ello, los modelos climáticos globales tienen una mejor representación de las regiones más desarrolladas del mundo. Aun cuando los países en desarrollo han sido incorporados en estos modelos, su bajo nivel de emisiones, en ocasiones las limitaciones en información disponible y la capacidad de modelación local, han resultado en una representación con menor detalle dentro de los modelos globales. China e India son casos excepcionales, debido a su importancia como potencias económicas globales y como emisores de gases de efecto invernadero. Varios modelos incluyen estos países de manera detallada.

América Latina emite aproximadamente 6% de las emisiones de GEI totales. Por esto, en la mayor parte de los modelos globales América Latina se representa como una sola entidad (América Latina) o esta agregada dentro de otras regiones en un módulo poco detallado denominado "Resto del Mundo".

Aun cuando América Latina se represente como una región separada del resto, esto es poco adecuado porque está integrado por una serie de países muy diversos, con distintos perfiles demográficos, sistemas políticos y estructuras y tendencias económicas. La agregación de todo esto en una sola región enmascara los distintos patrones de desarrollo que se observan al interior de esta. Por ello, es recomendable desagregar a América Latina en distintos países o regiones. De hecho, México es una de las dos economías más importantes de la región, junto con Brasil. Por ello, al menos este nivel de detalle es importante. Aun cuando estas dos economías todavía son marginales en términos de emisiones, pueden llegar a ser actores importantes dentro del entorno mundial.

Hoy en día, México tiene ya un papel preponderante dentro de las negociaciones internacionales al haber hecho pública su meta aspiracional de reducción del 50% de sus emisiones para el año 2050 con respecto a las emisiones del 2000. Además, es un país de un nivel de desarrollo tal que pudiera fungir como líder en los acuerdos post-Kioto de un bloque conformado por países similares como Turquía, Corea del Sur, Indonesia, Sudáfrica, India y China, entre otros. Por otro lado, México es un socio comercial importante en la región de América del Norte, y por la trayectoria que está tomando la política ambiental internacional, es altamente probable que la mitigación de emisiones se de a través de bloques comerciales, siendo América del Norte una región de gran relevancia ya que contribuye con aproximadamente el 30% de las emisiones globales.

Todas estas posibilidades hacen necesario que México esté representado de mejor manera dentro de alguno de los modelos globales de valoración integral de economía y

cambio climático. Esto permitirá por un lado, entender los impactos sobre México de los distintos escenarios de cambio climático a nivel global, tanto a partir de distintas trayectorias de crecimiento de emisiones como de concentraciones de gases de efectos invernadero. Permitirá asimismo hacer simulaciones realistas de políticas públicas instrumentadas en México donde se pueda analizar su impacto tanto sobre el propio país como en la región y a nivel mundial. Esto, por último, también permitirá tener elementos para participar de manera más certera en negociaciones internacionales, al contar con información sobre costos y beneficios de posibles compromisos en materia ambiental adquiridos como país.

A continuación se abordarán algunos aspectos generales sobre los modelos integrados de economía y cambio climático para poder abordar la parte sustantiva del estudio en la que se describen primeramente los modelos climáticos y posteriormente los modelos económicos utilizados para la elaboración de los escenarios globales de emisiones y en la evaluación de políticas nacionales y regionales de mitigación. Finalmente, se describe el modelo seleccionado y sus potenciales aplicaciones para el análisis de políticas públicas en México.

2. ASPECTOS GENERALES DE LOS MODELOS INTEGRALES DE ECONOMÍA Y CAMBIO CLIMÁTICO

Los modelos de valoración integral de economía y cambio climático tienen por objeto analizar las interacciones entre los sistemas socioeconómicos y las variables que conforman los sistemas naturales. El problema del cambio climático representa un reto formidable para las ciencias sociales y naturales. Por un lado, requiere la modelación del sistema climático del planeta y por el otro realizar una evaluación de las interrelaciones entre las variables físicas de los sistemas y sus interacciones con la economía.

Las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero representan para los sistemas físicos perturbaciones que alteran el equilibrio térmico del planeta. Dicho desequilibrio conlleva afectaciones a los sistemas naturales (tales como potenciales perturbaciones peligrosas de las funciones reguladoras de la atmósfera, con sus múltiples implicaciones en los ecosistemas terrestres) y a los sistemas económicos (tales como daños a la agricultura, silvicultura, infraestructura, salud, entre otros). Mayores emisiones implican mayores cambios en los sistemas naturales, y a su vez, mayores impactos socioeconómicos. Por otra parte, la mitigación de emisiones implica costos para los sistemas económicos actuales.

Como se analizará en este documento, existen actualmente un número basto de modelos climáticos. Dichos modelos tienen por objeto determinar las principales variables físicas tales como temperatura, patrones de precipitación, vientos, etc. Los modelos climáticos a fin de poder realizar sus proyecciones requieren como datos los escenarios de emisiones que se prevé tengan lugar en el largo plazo. La construcción de dichos escenarios de emisiones, requiere necesariamente de un análisis prospectivo del comportamiento de la economía mundial. Podríamos decir que los modelos climáticos consideran la parte social al incorporar los escenarios de emisiones que a su vez son resultado de los modelos económicos.

Con el fin de realizar dicha evaluación prospectiva de emisiones se requiere de la modelación de la economía global, en periodos de tiempo largos, usualmente hasta el 2100 y recientemente se han iniciado ejercicios de modelación al 2300. Evidentemente modelar la economía en el largo plazo es un ejercicio que implica elevadas incertidumbres, por lo que se elaboran múltiples escenarios para considerar los diversos cursos que podría tomar la economía mundial.

La modelación económica requiere de realizar supuestos en múltiples variables; entre ellas destacan las previsiones sobre crecimiento demográfico a nivel mundial, las previsiones sobre el crecimiento de la actividad económica y las estimaciones sobre la penetración de energías de bajas emisiones de carbono. Como resultado de los modelos económicos obtenemos información sobre la producción global, del uso de los recursos y su intensidad, así como las emisiones asociadas a un nivel de actividad económica.

Por su parte, los modelos integrados de economía y cambio climático consideran los resultados de los modelos climáticos para simular los efectos en la economía de políticas de mitigación y de los daños del cambio climático. Los modelos que se enfocan a evaluar políticas de mitigación, por ejemplo, evalúan cual puede ser el nivel de emisiones para

lograr un objetivo de estabilización así como su perfil en el tiempo¹. Como resultado de estos modelos obtenemos los costos de mitigación, ya sea en términos costo total para la economía o como indicadores de precios por tonelada de CO_{2e}. Los modelos que se construyen para evaluar daños del cambio climático consideran, por ejemplo, el incremento en la temperatura resultante de los modelos climáticos, para realizar una valoración de impactos sectoriales, tales como daños en la agricultura.

Los modelos integrados han tenido un gran desarrollo desde la década de los 90's, como resultado directo del esfuerzo internacional de atender el problema del cambio climático, debido a la necesidad de contar con mayor información sobre las repercusiones que las políticas de mitigación pueden tener en el crecimiento económico y estimaciones sobre los daños del cambio climático en distintos sectores. La comunidad científica a nivel internacional ha avanzado en integrar el avance en la modelación del clima con los avances en la modelación económica, a fin de brindar la mejor información disponible para la toma de decisiones de política pública. Sin embargo, aun se requiere de esfuerzos para integrar todas las interacciones. Por ejemplo, es necesario integrar en mayor medida en los modelos globales el impacto de las políticas de adaptación.

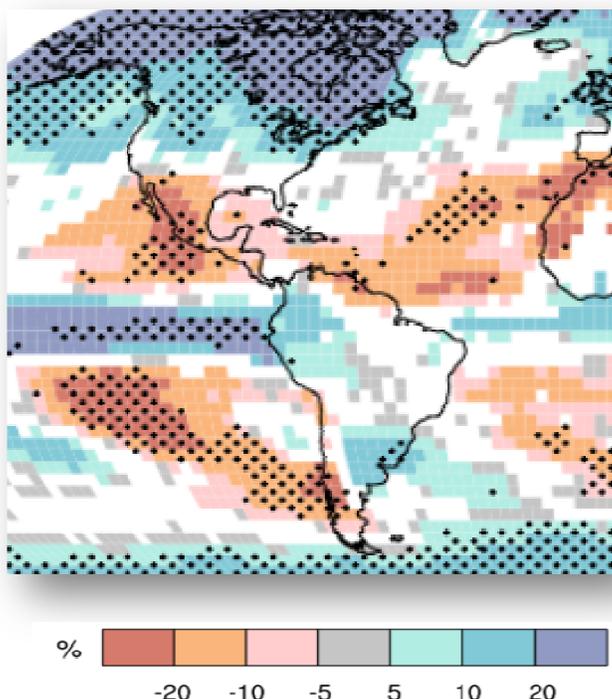
Las emisiones de gases de efecto invernadero representan externalidades a nivel global. La mitigación de emisiones y la adaptación al cambio climático representa un problema económico inter-temporal de largo plazo que incide en las inequidades socioeconómicas más fundamentales. Por ejemplo, las emisiones que actualmente han contribuido más al problema pueden asociarse al desarrollo industrial de los países más ricos del mundo. Los daños esperados del cambio climático, en contraparte, se sentirán con mayor fuerza en los países en los trópicos, donde se ubican países de menor desarrollo.

Por el carácter de bien público global de la atmósfera y debido a que las externalidades requieren de intervenciones de política pública para ser internalizadas, los problemas de cooperación internacional son de alta complejidad. Hasta este momento, los modelos proporcionan información sobre las repercusiones económicas del cambio climático a nivel global, y algunos países, cuentan con análisis detallados sobre los impactos esperados en sus economías.

México requiere de realizar análisis detallados con los mejores modelos y marcos teóricos disponibles, que incorporen las características intrínsecas de su economía a fin de que su posición en las negociaciones internacionales considere por un lado los costos reales de mitigación en el país y por otro su vulnerabilidad al cambio climático.

Hasta este momento, México cuenta con información suficiente para prever impactos importantes en su economía. Por ejemplo, en la gráfica siguiente, observamos el indicador de cambios de precipitación, resultante de modelos climáticos globales. Como se puede observar, múltiples modelos climáticos han obtenido como resultado que en el mundo, y en particular en México, se esperan variaciones severas en los patrones de precipitación. Estos resultados indican que es conveniente para México avanzar en modelaciones más detalladas de los impactos climáticos esperados a fin de poder evaluar con una mayor resolución las variaciones esperadas, ya que los modelos globales proporcionan información pero a gran escala.

¹ Por el carácter de permanencia de las emisiones en la atmósfera es necesario realizar un análisis intertemporal pues los impactos son función del tiempo en que se emiten y no sólo del total de emisiones.



Nota: Los puntos reflejan más del 90% de acuerdo en el signo del cambio entre los diversos modelos aplicados

Figura 1. Cambios en la precipitación estimados

Fuente: IPCC 2007, WG1-AR4

Por otra parte, los modelos globales de economía y cambio climático han considerado con muy poco detalle la economía mexicana en su análisis, y en la mayoría de los casos únicamente la engloban en la región latinoamericana. Los resultados globales de los modelos económicos pueden resumirse en la Tabla 1, que se tomó del Cuarto Informe del IPCC. Como se observa, las variaciones en el PIB mundial en el 2030 y 2050, para un escenario de estabilización de entre 445 a 535 ppm, estaría en el orden de una reducción del promedio anual de las tasas de crecimiento menor a 0.12% (una pérdida total de 3 y 5.5% del PIB mundial, respectivamente para cada periodo).

Es importante mencionar que los resultados que presenta el IPCC para todo el mundo consideran hasta este momento la homologación de las políticas de mitigación del cambio climático (i.e. un impuesto global a las emisiones sin diferencias regionales, intercambio irrestricto de emisiones, etc.). Evidentemente, dada la situación política real de las negociaciones, es necesario que el país evalúe cuales serían las implicaciones concretas para México de relajar dichos supuestos. Para el país, es importante no sólo conocer los resultados agregados a nivel global, sino las repercusiones nacionales. Políticas agresivas de mitigación de corto plazo pueden, por ejemplo, beneficiar al país al reducir los impactos de largo plazo sobre el sector agrícola, pero al mismo tiempo, requerir una política que considere los impactos de la mitigación a nivel nacional e internacional en su mezcla energética y en sus exportaciones petroleras, por mencionar dos temas relevantes para la Secretaría de Energía.

Tabla 1. Estimación de costos macroeconómicos de políticas mundiales de mitigación para escenarios de estabilización en 2030 y en 2050.

Nivel de estabilización (ppm de CO ₂ eq)	Mediana de la reducción del PIB mundial (%)		Franja de reducción del PIB mundial (%)		Reducción del promedio anual de las tasa de crecimiento del PIB mundial (en puntos porcentuales)	
	2030	2050	2030	2050	2030	2050
445-535	No disponible		<3	<5.5	<0.12	<0.12
535-590	0.6	1.3	0.2 y 2.5	Ligeramente negativo y 4	<0.1	<0.1
590-710	0.2	0.5	-0.6 y 1.2	-1 y 2	<0.06	<0.05

Fuente: IPCC, SPM-AR4

De particular relevancia, por el alto grado de integración con la economía de los Estados Unidos, para México es fundamental contar con un modelo que permita evaluar las políticas que se implementen en la región norteamericana, considerando los nuevos acuerdos internacionales en el marco de la Convención Marco de Naciones Unidas, así como posibles políticas regionales. Indudablemente, contar con un modelo ampliamente utilizado en los Estados Unidos que incorpore las modificaciones necesarias para el análisis de la economía mexicana, permitirá el análisis comparativo de las políticas climáticas en la región. El modelo global seleccionado permitirá evaluar el impacto en el país en múltiples sectores de la economía tales como el sector energético, el agrícola, y en general en el comercio internacional.

Las modelaciones integrales son complejas por definición, porque tratan de incorporar en un marco analítico los resultados de las ciencias naturales y de las ciencias sociales, con el fin de que las políticas públicas para atender el cambio climático puedan considerar el mejor estado de las ciencias para la toma de decisiones. Estos modelos son por naturaleza interdisciplinarios y su desarrollo ha sido vasto a medida que el problema del cambio climático ha tomado una relevancia primordial en la política internacional.

La propuesta de arquitectura modelística que se presenta a continuación se deriva de una revisión amplia de los modelos disponibles a nivel internacional. Incluye una revisión de los modelos climáticos más relevantes y una revisión de los modelos integrados utilizados en la elaboración de escenarios de emisiones globales por el IPCC, así como de las características fundamentales de los modelos integrados utilizados por países seleccionados para evaluar sus políticas de mitigación.

El presente documento identifica la arquitectura del modelo global IGSM-EPPA como la idónea, ya que incorpora el estado del arte en la ciencia tanto en la modelación climática como en la económica. En adición, dicho modelo es utilizado en los Estados Unidos como uno de los modelos de referencia que utiliza el gobierno y la comunidad científica para evaluar las políticas a implementar en dicho país, por lo que contiene a detalle las interacciones más relevantes que son de interés para México en la región. El documento identifica también las componentes necesarias para poder establecer un sub-sistema de análisis del caso mexicano en dicho modelo, donde se pueda integrar la información

recopilada y organizada de los productos I, II y III de esta consultoría de tal suerte que se cuente con todos los elementos para que la Secretaría de Energía pueda implementar un modelo integral de economía y cambio climático con la mejor fundación científica y adaptado a las necesidades del país.

3. MODELOS CLIMÁTICOS DEL CUARTO REPORTE DE EVALUACIÓN DEL IPCC

En preparación del Cuarto Informe de Evaluación del Cambio Climático (AR4) por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), se instituyó el Programa de Diagnóstico y Comparabilidad de Modelos de Clima (PCMDI), para coadyuvar en el desarrollo de mejores métodos y herramientas para el diagnóstico y la comparación de los modelos de circulación general, además de almacenar y distribuir las bases de datos y los resultados de las simulaciones de los modelos de circulación global de los distintos centros de investigación. Para ello, el PCMDI compiló los resultados de los modelos de los principales centros a nivel mundial, permitiendo hacer investigación relevante a aquellos modeladores fuera de estos centros. Esta investigación debía ser de utilidad para los climatólogos que estaban preparando el AR4. Esta recopilación sin precedente de resultados de los modelos se conoce como “la Base de datos Multi-Modelos WCRP CMIP3”. Esto ayudó al Grupo de Trabajo I del IPCC para que se avocara al estudio del sistema climatológico con una serie de modelos comparables que permitieran reducir la incertidumbre con respecto a los impactos esperados del cambio climático provocado por las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero y de aerosoles. Estos modelos son los que se describen en esta sección.

3.1. El Clima y el Sistema Climático

El clima generalmente se define como el promedio de las condiciones climáticas, representado a través de la media y la variabilidad de algunos parámetros durante varias décadas. Los valores que se observan son generalmente los de temperatura, precipitación y velocidad y dirección del viento. El clima es realmente la descripción del estado del sistema climático.

El sistema climático está conformado por la atmósfera, los océanos, las biosferas terrestres y marinas, la criósfera (hielos marinos, cobertura estacional de nieve, glaciares montañosos y cobertura continental de hielo), y la superficie terrestre. Estos componentes interactúan y a través de esta interacción colectiva determinan el clima en la superficie de la Tierra. Estas interacciones se dan a través del flujo de energía mediante intercambio de calor, de agua y del flujo de gases a través de ciclos de nutrientes. La radiación solar es quien inicia este ciclo, que logra su balance a través de la emisión de radiación infrarroja - o calor- hacia el espacio. La energía solar es pues la fuerza motriz del movimiento de la atmósfera y del océano, de los flujos de calor y de agua y de la actividad biológica. La Figura 2 muestra los componentes del sistema climático y las principales interacciones entre estos componentes.

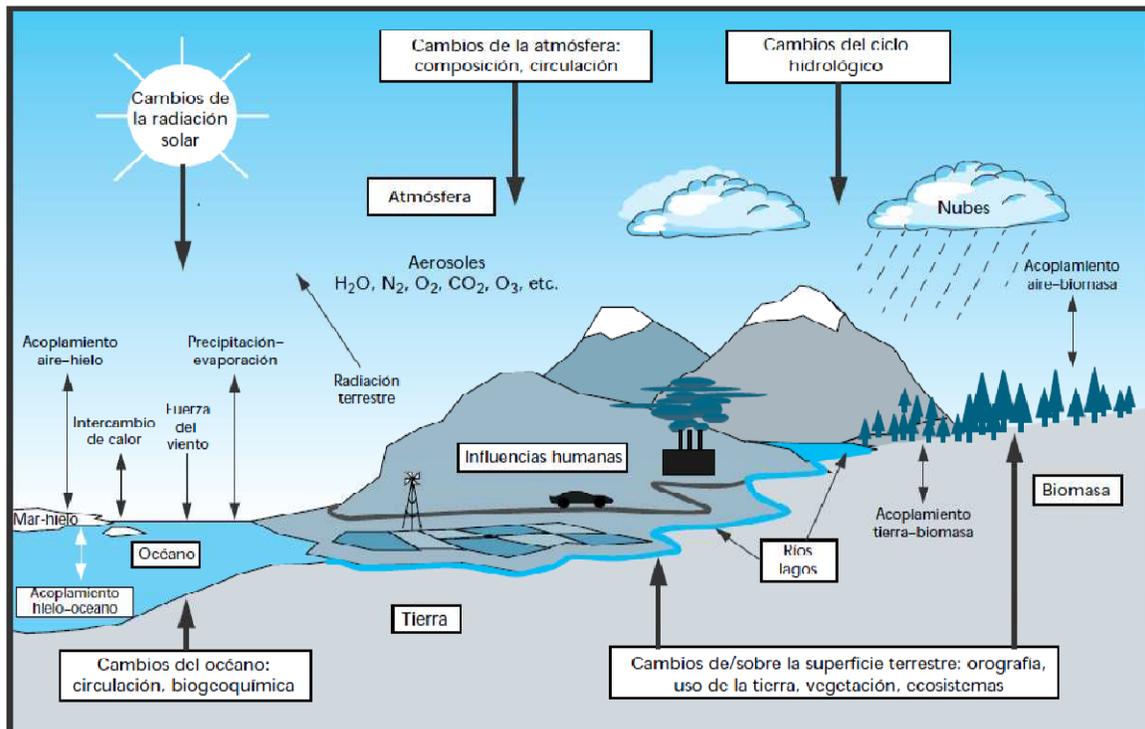


Figura 2. Componentes del sistema climático global relevantes para el cambio climático en una escala de 100 años

Fuente: IPCC, 1997.

Los componentes de este sistema climático influyen sobre el clima global y regional de distintas maneras. Una de ellas es a través de cambios en la composición de la atmósfera al cambiar la capacidad de absorción y transmisión de la energía solar, y la emisión de calor hacia el espacio. Otra forma puede ser a través de alteraciones de la superficie terrestre y en la cobertura y características de las nubes. Una forma más puede ser al haber cambios en los patrones de distribución de calor tanto horizontal como verticalmente entre regiones por corrientes oceánicas y marinas.

En condiciones normales, los flujos entre los componentes se balancean para llegar a un equilibrio en periodos que van de una a varias décadas, pero pueden haber desbalances de un año al otro debido a la variabilidad natural del sistema climático. Sin embargo, el ser humano está afectando estos balances naturales a través de alteraciones a escala global de la composición atmosférica y de las propiedades de la tierra (cobertura vegetal, por ejemplo). La emisión de gases de efecto invernadero ha llevado a un exceso de la absorción de energía solar con respecto a la emisión de radiación infrarroja al espacio. Esto ha llevado a un aumento en la temperatura, pero a su vez, lleva a un aumento en la emisión de calor. Esto reducirá el desbalance que se ha creado y la Tierra alcanzará un nuevo balance, pero con una mayor temperatura. Los modelos del clima sirven pues para entender y simular esta interacción entre los componentes y ver los efectos sobre variables importantes para la vida humana.

3.2. Componentes de los Modelos Climáticos

Para entender la relación entre los componentes del sistema climático y ver qué podría pasar al crearse desbalances entre ellos se han construido modelos de clima. Estos han contribuido al mejor entendimiento de los procesos de retroalimentación entre los distintos componentes. Por consideraciones prácticas se ha optado por hacer distintos tipos de simplificaciones dentro de los modelos, dando origen a diferentes tipos de modelos. Aun cuando se han jerarquizado los modelos en función de distintas características, esto no implica superioridad de un modelo sobre otro. Más bien, dependiendo del tipo de preguntas que se planteen, un modelo con menor nivel de complejidad puede resultar mejor que uno más complejo, o uno con una resolución local puede ser más útil en un momento dado que uno con resolución global. El modelo más adecuado dependerá entonces del contexto del análisis y de la disponibilidad de información.

Estos modelos se diferencian por cuatro aspectos principalmente: su resolución espacial, el nivel al que entra la parametrización, el número de dimensiones con el que se modela cada componente y el grado de complejidad del modelo.

Resolución espacial – Si se traza una retícula tridimensional donde se ubique el planeta, el espacio entre los puntos de la retícula es la "resolución espacial". Mayor será la resolución, cuanto mayor sea el número de puntos, pero mayor será la cantidad de cálculos que se deberán hacer. Por lo tanto, la resolución está limitada por los recursos computacionales disponibles. La resolución que típicamente se usa en un modelo climático complejo es cientos de kilómetros en la escala horizontal. Sin embargo, muchos elementos importantes del sistema climático (por ejemplo, las nubes, variaciones de temperatura en la superficie de la tierra) tienen escalas mucho más pequeñas, por lo que en ocasiones se usan modelos de complejidad intermedia o modelos simples capaces de resolver a una menor escala. El IPCC hace uso de tres tipos de modelos. Los modelos computacionales de cambio climático más generales son los Modelos acoplados de Circulación General Atmosférica-Oceanográfica (MCGAOs), que se conocen también como modelos complejos. Estos tienen una resolución de cientos de kilómetros. Otros modelos pueden tener una resolución más fina.

Parametrización

Otra diferencia importante entre estos modelos es el nivel al que se meten parámetros estimados a través de análisis empíricos. Para reflejar procesos de clima de menor escala se usan relaciones estimadas de manera empírica para aproximar los efectos netos (o un promedio para el área) en la escala de la resolución del modelo y estos se introducen como parámetros en el modelo. Es importante subrayar que todos los modelos de sistema climático contienen parámetros y que ningún modelo deriva sus resultados totalmente de principios primarios. La principal diferencia conceptual entre los modelos simples y complejos es el nivel jerárquico en el que entran estos parámetros definidos de manera empírica.

Dimensionalidad

En los modelos las cantidades físicas pueden variar continuamente en tres dimensiones, representadas por sus valores en un número finito de puntos organizados en una retícula tridimensional. Un tipo de simplificación utilizada en los modelos climáticos es promediar sobre una dimensión espacial. Por lo tanto, en lugar de una retícula de altitud-longitud- latitud tridimensional, se podría utilizar una

cuadrícula de latitud-altitud bidimensional, donde cada punto es un promedio de todas las longitudes en esa latitud y altura. Cuando se reducen las dimensiones, es necesario parametrizar más procesos.

Existe una gran gama de modelos de circulación general cuya diferencia estriba en el número de dimensiones que se usan para modelar la atmósfera o el océano y el grado de detalle en cada uno de sus componentes. En cuanto a la dimensionalidad, están los modelos unidimensionales, bidimensionales y tridimensionales. Los modelos unidimensionales sólo hacen alusión a una de las dimensiones relevantes. Por ejemplo, solamente se toman valores para las distintas capas de la atmósfera, pero se toma el mismo valor para toda la longitud de la misma, o se estudian con detalle las capas del océano, pero sin hacer distinciones longitudinales. Los modelos bidimensionales que abordan aspectos de latitud-altitud, por ejemplo, para la circulación de las corrientes dentro de la atmósfera. Esto permite obtener valores dentro del modelo, más que usar parámetros obtenidos de manera exógena. Por último están los modelos tridimensionales. Estos son los modelos de circulación general, que tienen tres dimensiones dentro de sus componentes.

Complejidad de los modelos

Radica en el número de componentes utilizados dentro de una misma simulación y del grado de detalle de cada uno. Los modelos tridimensionales de circulación general atmosférica-oceánica (MCGAOs) son los modelos más complejos, y estos son los usados por el IPCC para ver los escenarios ante distintas concentraciones de gases de efecto invernadero. Estos modelos generalmente dividen la atmósfera o el océano en una retícula con una resolución típica de 2-4° de latitud por 2-4° de longitud en los modelos más recientes y normalmente modelan de 10 a 20 capas de manera vertical. Simulan directamente vientos, la circulación oceánica y muchas otras variables y procesos que caracterizan a la atmósfera y al océano. Tanto los modelos de circulación general atmosférica como oceánicos se han utilizado ampliamente de forma independiente, con temperaturas de superficie del océano y hielo marino definidas en forma exógena en el caso de los modelos de circulación general atmosférica, y con temperaturas de superficie y salinidad predeterminadas, así como el calor correspondiente y flujos de agua dulce, en el caso de los modelos de circulación oceánica. Un Modelo de Circulación General Atmosférica-Oceánica, MCGAO, consiste en un modelo atmosférico acoplado a uno oceánico con información sobre el estado de la atmósfera y océanos adyacentes para calcular el intercambio de calor, humedad y corrientes entre los dos componentes.

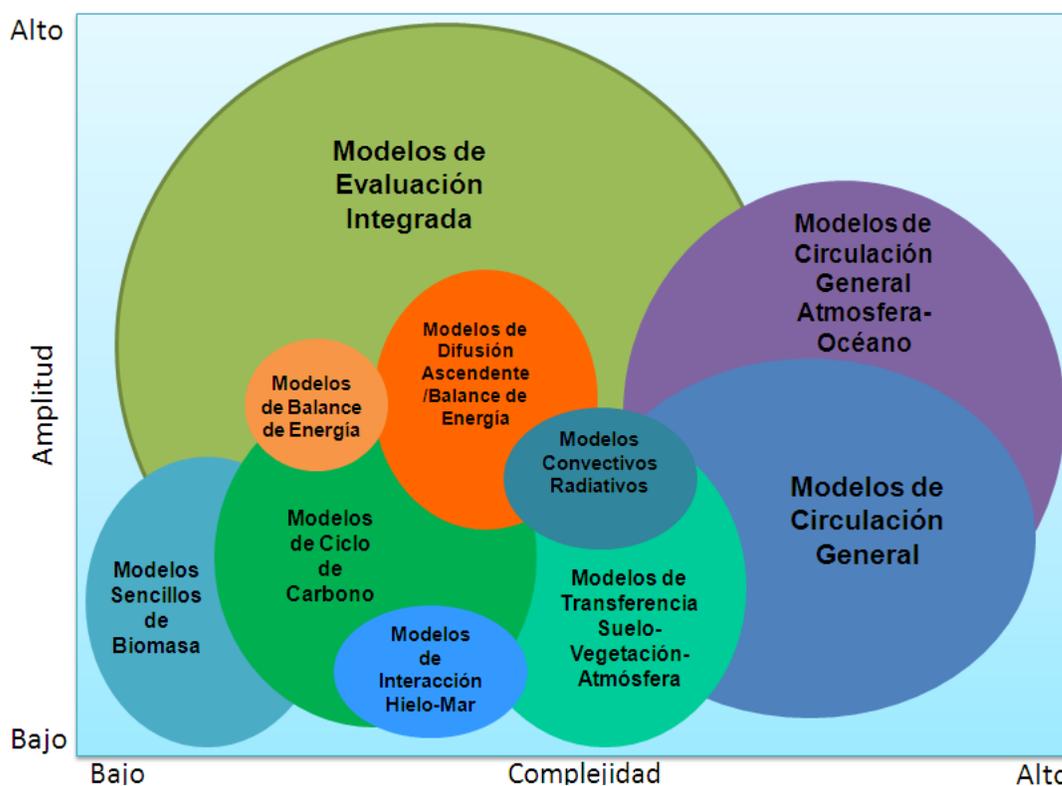


Figura 3. Comparación de Modelos del Clima

Fuente: IPCC 1997

A manera de resumen, la Figura 3 hace una esquematización de cómo se comparan los distintos tipos de modelos de clima a partir de qué tan comprensivos son y de su grado de complejidad. En este caso, lo comprensivo de los modelos se refiere al número de componentes y procesos dentro del modelo. La complejidad se refiere al nivel de detalle de los componentes. Los modelos más complejos son los más alejados del origen mientras que los modelos de complejidad intermedia se acercan a uno de los dos ejes. Los modelos simples se ubican cerca del origen.

3.3. Modelos de Circulación General Atmosférica-Oceanográfica (MCGAOs)

El Cuarto Reporte del IPCC (2007) utiliza 25 modelos de circulación general para simular condiciones climáticas actuales y futuras bajo distintos escenarios de emisiones y de concentraciones de gases de efecto invernadero. Esto ha permitido tener un rango de resultados, y no resultados puntuales, lo que hace más creíble las tendencias esperadas. Los modelos utilizados en el Cuarto Reporte de Impacto del Cambio Climático preparado por el IPCC se muestran en la Tabla 2.

Los modelos de circulación general atmosférica-oceanográfica (MCGAOs) son una representación numérica del sistema climático en términos de las propiedades físicas, químicas y biológicas de sus componentes, las interacciones y procesos de

retroalimentación entre ellos, y la contabilización de todas o algunas de sus propiedades conocidas. Cada uno de los componentes de estos modelos es tridimensional y se resuelve para distintos periodos de tiempo, e incluyen una representación de las ecuaciones de movimiento sobre una esfera, que simula la tierra, donde se van observando las variaciones en este componente a lo largo del tiempo (ver por ejemplo los cambios esperados en temperatura y en la cobertura de hielo en la página del Hadley Centre²).

Tabla 2. Modelos de Circulación General Atmosférica-Oceanográfica AR4

GRUPO DE MODELACION	PAIS	I.D. CMIP3 ^a
Centro Climático de Pekin	China	BCC-CM1
Bjerknes Centre for Climate Research	Noruega	BCCR-BCM2.0
National Center for Atmospheric Research	EUA	CCSM3
Canadian Centre for Climate Modelling & Analysis	Canadá	CGCM3.1(T47)
Canadian Centre for Climate Modelling & Analysis	Canadá	CGCM3.1(T63)
Météo-France / Centre National de Recherches Météorologiques	Francia	CNRM-CM3
CSIRO Atmospheric Research	Australia	CSIRO-Mk3.0
CSIRO Atmospheric Research	Australia	CSIRO-Mk3.5
Max Planck Institute for Meteorology	Alemania	ECHAM5/MPI-OM
Meteorological Institute of the University of Bonn, Meteorological Research Institute of KMA, and Model and Data group.	Alemania / Corea	ECHO-G
LASG / Institute of Atmospheric Physics	China	FGOALS-g1.0
US Dept. of Commerce / NOAA / Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	EUA	GFDL-CM2.0
US Dept. of Commerce / NOAA / Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	EUA	GFDL-CM2.1
NASA / Goddard Institute for Space Studies	EUA	GISS-AOM
NASA / Goddard Institute for Space Studies	EUA	GISS-EH
NASA / Goddard Institute for Space Studies	EUA	GISS-ER
Instituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia	Italia	INGV-SXG
Institute for Numerical Mathematics	Rusia	INM-CM3.0
Institut Pierre Simon Laplace	Francia	IPSL-CM4
Center for Climate System Research (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Frontier Research Center for Global Change (JAMSTEC)	Japón	MIROC3.2(hires)
Center for Climate System Research (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Frontier Research Center for Global Change (JAMSTEC)	Japón	MIROC3.2(medres)
Meteorological Research Institute	Japón	MRI-CGCM2.3.2
National Center for Atmospheric Research	EUA	PCM
Hadley Centre for Climate Prediction and Research / Met Office	R. Unido	UKMO-HadCM3
Hadley Centre for Climate Prediction and Research / Met Office	R. Unido	UKMO-HadGEM1

^a/ Nombre con el que se identifica el modelo en la fase 3 del Proyecto de Comparación de Modelos Acoplados (CMIP3, por sus siglas en inglés).

Fuente: CMIP3 2007

² <http://www.metoffice.gov.uk/climatechange/science/projections/>.

El término de MCGAOs se suele aplicar a los modelos que incluyen, además de los componentes de la atmósfera y los océanos, los componentes de la superficie terrestre y de grandes hielos, como aquellos en Groenlandia y en la Antártida. En general, estos cuatro componentes del modelo están acoplados, en virtud de que intercambian flujos entre ellos. Estos modelos proporcionan una representación relativamente amplia del sistema climático; se aplican como una herramienta para estudiar y simular el clima de largo plazo, pero también para pronosticar variaciones climáticas mensuales, estacionales, e interanuales, a nivel global.

El funcionamiento de estos modelos es a partir del acoplamiento de los módulos, esto es, se corre el componente atmosférico inicialmente y se acumulan los flujos (de calor, humedad y movimiento) en la interfase atmosférica-oceánica. Estos flujos se alimentan al componente oceanográfico, acumulando los flujos que deberán alimentarse en la siguiente iteración al componente atmosférico. Este proceso se repite una y otra vez durante la simulación hasta que los resultados dejan de variar entre iteraciones debido a que los flujos ya nos son significativos.

Generalmente además de los cuatro componentes antes descritos, estos modelos tienen otros módulos importantes, como un módulo del ciclo del carbón y un módulo de la química de la atmósfera, que a su vez interactúan con los demás módulos del modelo. El modelo acoplado que incluye la parte atmosférica, oceanográfica, del ciclo del carbón y la parte química se conoce como Modelo del Sistema Terrestre. La escala de resolución de estos modelos es bastante amplia, de cientos de kilómetros de resolución.

Estos modelos también se pueden correr a una menor escala, dando origen a resultados regionales, con una resolución de 25 Km. De hecho, de los 25 modelos usados en el AR4, cuatro de ellos fueron seleccionados por NARCCAP (el Programa Regional Norte Americano de Evaluación del Cambio Climático (NARCCAP, por sus siglas en inglés), para fijar las condiciones para los estudios regionales. Estos son (1) el modelo Community Climate System Model, versión 3 (CCSM3), del Centro Nacional de Investigación Atmosférica (National Center for Atmospheric Research de Estados Unidos, NCAR), descrito en Collins (2006); (2) el Canadian Coupled Global Climate Model versión 3 (CGCM3) (Flato 2005); (3) el modelo estadounidense Geophysical Fluids Dynamics Laboratory (GFDL) Climate Model versión 2.1 (CM2.1, GFDL 2004); y (4) el modelo británico Hadley Centre Climate Model versión 3 (HadCM3), descrito en Gordon (2000) y Pope (2000). En Randal et al (2007) se puede encontrar mayor detalle sobre los modelos. Todos estos modelos han participado en los ejercicios del Panel Intergubernamental de Cambio Climático junto con los demás modelos globales y han probado ser efectivos para modelar condiciones climatológicas presentes y futuras, tanto a escala global como regional. Para ilustrar el funcionamiento general de los MCGAOs, se describen a continuación estos modelos.

CCSM3 (NCAR)

Este modelo, inicialmente denominado Community Climate Model (CCM, Modelo Comunitario Climático), fue creado por el Centro Nacional de Investigación Atmosférica en Estados Unidos en 1983, como un modelo de la atmósfera para ser usado por la comunidad de investigación. Su uso se ha expandido y el modelo se ha mejorado en los últimos veinte años. En un principio, este modelo no incluía modelos oceanográficos ni de hielos marinos, por lo que en 1994 se elaboró una propuesta para incluir modelos atmosféricos, de superficie terrestre,

oceanográficos y de hielos marinos en un Modelo del Sistema Climatológico (CSM). Desde entonces, la comunidad científica ha participado de manera activa en la elaboración del modelo, por lo que se cambió el nombre a Community Climate System Model (CCSM). Por su parte, el CCSM3.0 es una versión posterior del modelo acoplado, que se terminó en 2004. Provee a la comunidad investigadora un marco para hacer simulaciones climáticas. Se basa en modelos de componentes individuales que se conectan a través de un acoplador. Este diseño requiere de cuatro modelos de componentes: atmósfera, tierra, océanos y hielo marino. Cada componente se conecta a un acoplador y cada uno intercambia información solamente con el acoplador. En este sentido, CCSM no es un modelo climatológico, sino un marco para construir y probar varios modelos climatológicos para diversas aplicaciones.

CGCM3.1 (CCCMA)

El Modelo Climático Acoplado Canadiense de Tercera Generación (Canadian Coupled Global Climate Model, CGCM3) es la tercera versión elaborada por el Centro Canadiense de Modelación y Análisis Climatológico (CCCMA). Hace uso de componentes oceanográficos (Flato y Boer 2001) y de un componente atmosférico. También tiene un componente de hielo marino que tiene dos dimensiones (grosor promedio y concentración), además de dinámica de fluidos en las cavidades y aspectos termodinámicos. El modelo se ha mejorado para poder correrlo de manera cada vez más eficiente. Se puede correr a dos distintas escalas de resolución: una para obtener resultados en los componentes terrestre y atmosférico, y otra escala para hacer análisis del comportamiento de los océanos, lo que permite analizar las corrientes en los trópicos y mejora la resolución en el Ártico.

GDFL CM2.1 2005 (NOAA-GFDL)

En 2004 el gobierno de Estados Unidos a través de algunas instancias de investigación de alto nivel creó una nueva familia de modelos de circulación global atmosférica y oceanográfica, los modelos CM2.x, que se utilizaron para hacer estudios climatológicos en laboratorios federales (NOAA's Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL)). En este modelo, la atmósfera es un componente del modelo que contiene 24 niveles con una resolución capaz de identificar ciclones de latitud media que son los responsables de variaciones climáticas, pero no es capaz de resolver para huracanes ni tormentas. Este módulo puede representar cambios en radiación, mezclas a través de las capas contiguas de la atmósfera, movimientos de nubes y corrientes de aire causadas por gravedad, cambios en la distribución espacial del ozono y tiene la capacidad de representar el impacto de múltiples tipos de gases de efecto invernadero. El componente oceanográfico cuenta con 50 niveles y la resolución es capaz de modelar corrientes de los sistemas ecuatoriales importantes. También puede modelar cambios en la superficie dados por evaporación, precipitación, la convergencia de corrientes marinas, la absorción de luz solar debido a la concentración de clorofila, y puede representar la turbulencia debido a la mezcla generada por las mareas.

UKMO HadCM3 (Hadley Centre)

Este modelo se desarrolló en el Hadley Centre del Reino Unido. Es un modelo que acopla un modelo de circulación general atmosférica con un modelo de circulación

oceanográfica. Se destaca porque no necesita ajustes de flujos de calor ni agua en la superficie del océano para tener buenos resultados de sus simulaciones. El alto grado de resolución del océano en este modelo es una de sus principales ventajas, así como la combinación entre los componentes atmosférico y oceánico, que ha llevado a una mejora en el esquema de mezclas en el océano. Está compuesto por dos componentes: el modelo atmosférico HadAM3 y el modelo oceánico (que incluye el modelo de hielo marino). Las simulaciones usan generalmente un calendario de 360 días donde cada mes tiene 30 días.

Como se puede ver a partir de la descripción de estos cuatro modelos, todos ellos son bastante parecidos en cuanto a sus componentes y a los sistemas de retroalimentación entre ellos, pero difieren en cuanto a su capacidad de simular algunos aspectos específicos, como la mezcla al interior de un componente, por ejemplo, o los flujos de ajuste entre los componentes. Las diferencias entre los modelos los hace complementarios y usarlos en un esfuerzo coordinado para hacer simulaciones con los mismos parámetros permite al IPCC tener resultados más confiables en cuanto a los efectos físicos esperados del cambio climático.

3.4. Modelos del Sistema Terrestre de Complejidad Intermedia (MTCIs)

Existe una amplia gama de modelos que se pueden usar para simular el clima. En un extremo están los modelos complejos, descritos en la sección anterior. En el otro extremo están los modelos simples. Los modelos de complejidad intermedia, a su vez, tienen una utilidad práctica para cierto tipo de análisis. Hay varios tipos de modelos de complejidad intermedia. En algunos el número de componentes y/o el detalle de su descripción se reduce para poder incorporar procesos de retroalimentación de una mayor cantidad de componentes. Otros modelos muestran un menor grado de interacción entre los componentes; estos modelos en ocasiones se usan para proyecciones de muy largo plazo, y sirven para hacer simulaciones para estudiar aspectos específicos de la variabilidad climática. Los modelos de complejidad más a los modelos acoplados de circulación general que a los modelos simples (o conceptuales), pero son complementarios a ambos y todos son importantes para tener buenos modelos que respondan a distintas preguntas respecto al clima.

Según Claussen (2000) los modelos se pueden clasificar de acuerdo a tres características: el grado de interacción entre los componentes del sistema natural terrestre; el número de procesos descritos explícitamente; y el detalle de la descripción de los componentes. Así, los modelos de complejidad intermedia se muestran en la Figura 4.

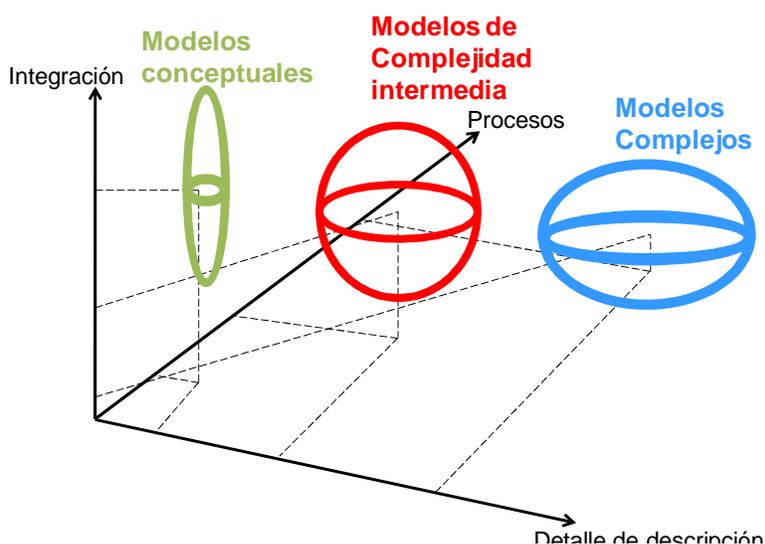


Figura 4. Modelos del Sistema Terrestre de Complejidad Intermedia

Fuente: Claussen 2000

Los MTCIs describen la mayor parte de los procesos de los MCGAOs, pero de manera más simplificada. Simulan de manera explícita la interacción entre varios componentes del sistema climático, incluyendo los procesos bioquímicos. Sin embargo, son suficientemente sencillos para permitir hacer simulaciones del clima de muy largo plazo. Están diseñados para describir el sistema natural de la Tierra, considerando que las interacciones de los humanos con la naturaleza son una fuerza exógena.

Tabla 3. Referencias de los principales MTCIs

MODELO	REFERENCIAS BASICAS
1. Bern 2.5D	Stocker et al. (1992), Marchal et al. (1998)
2. CLIMBER-2	Petoukhov et al. (2000), Ganopolski et al. (2000)
3. EcBilt	Opsteegh et al. (1998)
4. EcBilt-CLIO	Goosse et al. (2000)
5. IAP RAS	Petoukhov et al. (1998), Handorf et al. (1999), Mokhov et al. (2000)
6. MPM	
7. MIT	Prinn et al. (1999)
8. MoBidiC	
9. PUMA	Fraedrich et al. (1998), Maier-Reimer et al. (1993)
10. UVic	Weaver et al. (2000)

Fuente: Claussen et al 2000.

La Tabla 3 muestra los principales modelos de complejidad intermedia a nivel mundial. Los modelos 2, 6 y 8 están diseñados para estudiar los procesos de retroalimentación dentro del sistema climático en periodos que van de cientos a miles de años. Los modelos 3 y 4 se enfocan a los procesos dinámicos entre la atmósfera, los océanos y la vegetación en las latitudes medias y altas, y el modelo 9 ve dichos procesos de manera global, en periodos que van de décadas a miles de años. Los modelos 1 y 10, se concentran en el efecto de la circulación termohalina de gran escala sobre el sistema climático, también para periodos que van de diez a miles de años en el caso del modelo 10 y para periodos aún más largos en el caso del modelo 1. El modelo 5 hace alusión al problema de variaciones climáticas en latitudes medias.

El modelo 7, desarrollado por el MIT (Instituto Tecnológico de Massachusetts), está diseñado de manera específica para simular el problema del cambio global. Es el único modelo de este tipo que contiene un componente de química de la atmósfera. Además, este modelo incluye un componente socioeconómico, donde existe una antropósfera interactiva, y donde la actividad humana no sólo se introduce en el modelo través de parámetros exógenos previamente especificados, sino que se modela de manera independiente. Está integrado por un modelo físico, el IGSM (Integrated Global System Model) y un modelo socioeconómico, el EPPA (Emissions Prediction and Policy Analysis). Este modelo también ha sido usando en el AR4 por el IPCC. Por el interés que este modelo despierta, será analizado con gran detalle en la sección 5.

3.5. Modelos Climáticos Simples (MCSs)

La diferencia fundamental entre los modelos simples y complejos es, por un lado, el grado de simplificación de los componentes y de los procesos involucrados; y por el otro, el nivel al que los parámetros se introducen dentro del modelo. En general, los modelos simples solo generan resultados de temperatura y cambios en la temperatura, reportándolos como promedios locales o globales. No estiman otras variables como precipitación. Sin embargo, estos modelos se resuelven en poco tiempo, por lo que se pueden simular distintos escenarios y hacer análisis de sensibilidad a través de variaciones en los parámetros. Por último, el análisis de los resultados es muy intuitivo en tanto que incluye pocos procesos. Por ello, la interpretación de los resultados de modelos simples puede servir para entender mejor el comportamiento de partes de los modelos más complejos.

Una aplicación concreta que se le da a estos modelos es calcular el cambio en temperatura a partir de modificaciones en la concentración atmosférica de gases de efecto invernadero. Los pasos para hacer esto en un modelo simple se describen en la Figura 4. Al final se pueden calcular datos como temperatura e impacto sobre el nivel del mar.

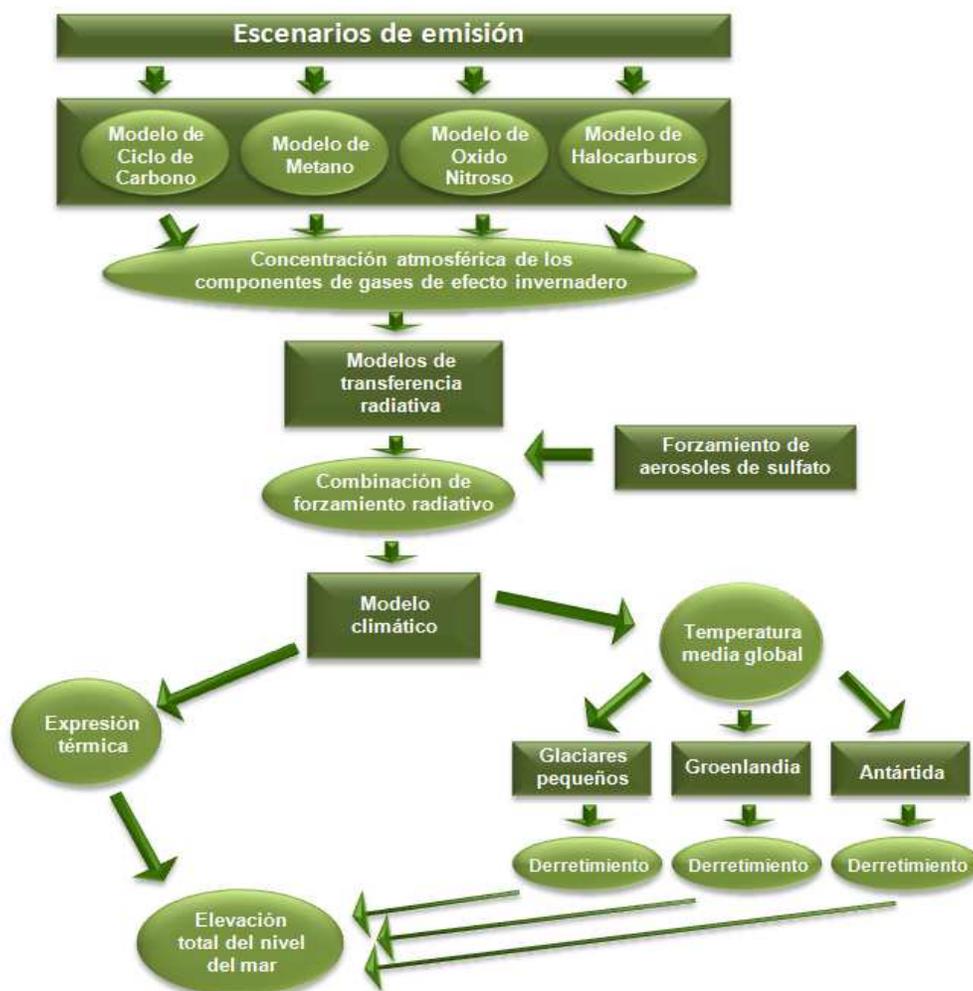


Figura 5. Pasos para estimar cambios en temperatura a partir de modelo simple

Fuente: IPCC 1997

En resumen, existen varios tipos de modelos y cada uno de ellos permite responder a distintas preguntas. En esta sección, estos modelos se analizaron con detalle y se identificó el modelo del MIT (IGSM-EPPA) como un modelo muy adecuado para hacer simulaciones relevantes para el caso de México. En la sección seis se describirán con detalle los componentes y la forma de operación de este modelo.

4. MODELOS GLOBALES PARA EVALUAR ESCENARIOS ALTERNOS DE DESARROLLO ECONÓMICO, ENERGÉTICO Y DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO

Con el propósito de seleccionar un modelo global que nos permita analizar las políticas de mitigación del cambio climático en México, se realizó una revisión de las características de los modelos utilizados por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) para evaluar los escenarios alternos de desarrollo económico, energético y de emisiones de gases de efecto invernadero. El IPCC ha establecido que es necesario considerar el avance científico y el estado del arte en las técnicas de modelación a nivel global, por lo que el enfoque que ha empleado en sus cuatro reportes es multi-modelo, de tal suerte que se incluya en la información que se pone a consideración de los países la gama existente de perspectivas para modelar los impactos físicos y económicos del cambio climático.

Los escenarios de emisiones utilizados por el IPCC fueron presentados en el Informe Especial sobre Escenarios de Emisiones publicado en el año 2000³. Dicho informe realizó una revisión de todos los modelos a nivel internacional que proporcionaban información sobre el futuro desarrollo de la economía y las consecuentes emisiones de gases de efecto invernadero; más de 500 escenarios fueron evaluados. Entre los modelos seleccionados por el IPCC para la realización del Informe Especial se encuentran 6 esfuerzos existentes en ese momento que se consideraron representativos de los enfoques de modelación utilizados a nivel internacional. Los modelos son: AIM⁴ y MARIA⁵ desarrollados en Japón, el ASF⁶ y el MiniCAM⁷ desarrollados en los Estados Unidos, y el IMAGE-WorldScan⁸ y el MESSAGE⁹ desarrollados en Europa (Holanda y Austria, respectivamente).

Dichos modelos incluyen tanto las aproximaciones tradicionalmente denominadas “top-down” y las conocidas como “bottom-up”. Las aproximaciones “top-down” realizan un análisis macroeconómico a fin de determinar el potencial de mitigación de emisiones,

³ Nakicenovic, N., J. Alcamo, G. Davis, B. de Vries, J. Fenham, S. Gaffin, K. Gregory, A. Grübler, T.-Y. Jung, T. Kram, E.L. La Rovere, L. Michaelis, S. Mori, T. Morita, W. Pepper, H. Pitcher, L. Price, K. Riahi, A. Reohrl, H.H. Rogner, A. Sankovski, M. Schlesinger, P. Shukla, S. Smith, R. Swart, S. van Rooijen, N. Victor, and Z. Dadi, 2000: Special report on emissions scenarios. Working Group III, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge, 595 pp.

⁴ Asian Pacific Integrated Model (AIM) from the National Institute of Environmental Studies in Japan (Morita et al., 1994)

⁵ Multiregional Approach for Resource and Industry Allocation (MARIA) from the Science University of Tokyo in Japan (Mori and Takahashi, 1999; Mori, 2000)

⁶ Atmospheric Stabilization Framework Model (ASF) from ICF Consulting in the USA (Lashof and Tirpak, 1990; Pepper et al., 1992, 1998; Sankovski et al., 2000)

⁷ Mini Climate Assessment Model (MiniCAM) from the Pacific Northwest National Laboratory (PNNL) in the USA (Edmonds et al., 1994, 1996a, 1996b)

⁸ Integrated Model to Assess the Greenhouse Effect (IMAGE) from the National Institute for Public Health and Environmental Hygiene (RIVM) (Alcamo et al., 1998; de Vries et al., 1994, 1999, 2000), used in connection with the Dutch Bureau for Economic Policy Analysis (CPB) WorldScan model (de Jong and Zalm, 1991), the Netherlands

⁹ Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact (MESSAGE) from the International Institute of Applied Systems Analysis (IIASA) in Austria (Messner and Strubegger, 1995; Riahi and Roehrl, 2000)

considerando el crecimiento económico esperado en el largo plazo. Los modelos “bottom-up” enfatizan el análisis tecnológico y regulatorio en sectores específicos, por lo que brindan información detallada, por ejemplo, sobre decisiones energéticas específicas. A pesar de realizar un análisis sectorial detallado, los modelos “bottom-up” generalmente evalúan el equilibrio parcial de la economía, por lo que consideran las variables macroeconómicas como dadas y no incluyen los mecanismos de retroalimentación hacia el resto de la economía. Las características de estos modelos se explicarán con mayor detalle en el capítulo 5.

Los modelos evaluados en el Informe Especial fundamentalmente realizaron escenarios de emisiones de CO₂ hacia el año 2100, con particular énfasis en el análisis de las emisiones del sector energía y de las emisiones industriales. Desde que se publicó dicho Informe, la comunidad científica a nivel internacional ha realizado avances significativos en la modelación. Dichos avances fueron revisados tanto en el Tercer como en el Cuarto Informe del Grupo III del IPCC, que analiza los temas de Mitigación.

Principalmente, se han ampliado y fortalecido la capacidad de modelación para el análisis de múltiples gases de efecto invernadero y de otras emisiones contaminantes (SO₂, NO_x, COV y partículas), a la modelación del cambio tecnológico y se han ampliado las opciones de mitigación a más sectores económicos. De particular relevancia, la modelación del sector forestal y agrícola ha sido incorporada al análisis de los modelos integrados, tanto por su componente física (impacto en los modelos climáticos), como por su componente económica (impactos en el mercado de alimentos, combustibles, usos de tierra, etc.)

Las conclusiones de estos trabajos muestran que se pueden reducir los costos de mitigación del cambio climático si se proveen mecanismos económicos que brinden flexibilidad en tres sentidos: qué reducir (enfoque multigases y multisectores), dónde reducir (mecanismos internacionales de comercio de emisiones) y cuándo reducir (por supuesto, asociado a una meta de estabilización global).

A continuación se describen los supuestos socioeconómicos en la elaboración de los escenarios del IPCC, así como una descripción cualitativa de los modelos utilizados en el Informe de Escenarios globales. En la sección siguiente se describen los esfuerzos actuales y modelos desarrollados para actualizar los escenarios que se pretende sean incorporados en un futuro Quinto Informe del IPCC, cuya fecha de publicación aun no ha sido acordada. La descripción de dichos esfuerzos presenta los aspectos críticos actualmente considerados por los principales grupos de modelación a nivel mundial.

4.1. Supuestos socioeconómicos para evaluación de escenarios de emisiones

El problema del cambio climático requiere de la elaboración de políticas de largo plazo que integren el análisis de sistemas complejos en su elaboración, en los que interactúan intensamente las variables físicas y socioeconómicas. Los gases de efecto invernadero se acumulan en la atmósfera por largos periodos de tiempo lo que ocasiona que sus impactos son de carácter inter-temporal. Como se explicó en el capítulo anterior, la modelación climática requiere de complejos modelos que integran las interrelaciones de los sistemas físicos. Por lo que hace a la parte socioeconómica, se requiere de realizar ejercicios de evaluación que permitan hacer una evaluación sobre: 1) los posibles escenarios de emisiones asociados a distintos supuestos sobre el desarrollo

socioeconómico mundial y 2) los costos y beneficios de la mitigación y la adaptación al cambio climático. Las interacciones de los modelos físicos y socioeconómicos conforman lo que se conoce como modelos de evaluación integrada.

Evidentemente, pronosticar el futuro económico en periodos de tiempo de 100 o más años, como requiere la elaboración de la política climática, conlleva complicaciones inherentes e incertidumbres elevadas. La comunidad científica a nivel internacional ha recurrido a la elaboración de “escenarios” de modelación en los que de forma transparente y consistente se toman supuestos específicos sobre el comportamiento futuro de los principales determinantes de los sistemas sociales y económicos. Por ejemplo, los distintos escenarios realizan supuestos sobre el grado de convergencia de las economías, sobre el crecimiento demográfico y sobre el cambio tecnológico, entre otros.

Una fórmula simplificada que permite entender las principales variables involucradas es la conocida identidad Kaya o de Impacto ambiental. La identidad define que Impacto = Población * Crecimiento económico * Tecnología. La identidad relaciona las emisiones antropogénicas de CO₂, con la población, el crecimiento de la actividad económica y el avance tecnológico. En términos generales, supone que el impacto crece con la población y con el aumento de la actividad económica y que decrece conforme existe avances tecnológicos que permiten desacoplar las emisiones del crecimiento económico. Se expresa a través de la siguiente forma.

$$E = P * (G / P) * (E / G) * (F / E) = P * g * e * f$$

Donde:

- E son las emisiones antropogénicas de CO₂
- P es la población mundial
- G es el PIB mundial $g = (G/P)$ es el PIB mundial per capita,
- E es el consumo de energía primaria a nivel global y $e=(E/G)$ es la intensidad energética de la economía global, y
- $f=(F/E)$ es la intensidad de carbón de la economía mundial

Evidentemente, existen modelos complejos para estimar cada una de las variables involucradas. Entre ellos los modelos utilizados en los estudios demográficos, los modelos sobre crecimiento económico y los modelos detallados que evalúan los sistemas energéticos considerando los recursos disponibles en una economía dada y en la economía mundial. Los distintos escenarios implícitamente asocian visiones o “narrativas” sobre el desarrollo económico al establecer supuestos sobre cómo se comportarán estas variables.

A fin de establecer escenarios que sean comparables, el IPCC¹⁰ decidió establecer supuestos comunes para la modelación, de tal forma que se puedan evaluar los distintos

¹⁰ Nakicenovic, opus cit.

modelos partiendo de un escenario base. Debido a las distintas incertidumbres en los determinantes del crecimiento socioeconómico el panel decidió crear “familias” de escenarios que comparten los mismos supuestos. Así, se han seleccionado cuatro principales “narrativas” sobre el futuro que definen lo que se conoce como “familias de escenarios” y que permiten modelar las emisiones considerando las diferentes posibilidades de crecimiento socioeconómico mundial.

- La primera de ellas, conocida como escenarios **A1**, describe un mundo en el que se tiene rápido crecimiento económico, la población mundial alcanza un máximo a mediados del siglo y decrece posteriormente, y existe una introducción rápida y eficiente de tecnologías. Implícitamente asume que existe convergencia económica entre las regiones y por tanto, una reducción en los diferenciales de ingreso per capita. Los distintos escenarios derivados de estos supuestos fundamentales se diferencian en las alternativas para el cambio tecnológico en el sistema energético. Así se crean 3 categorías de escenarios con esta narrativa: aquellas que visualizan un futuro con alta intensidad de uso de combustibles fósiles, uno en el que se elimina el uso de combustibles fósiles y finalmente uno con un balance entre fuentes fósiles y no fósiles de energía.
- La segunda categoría, **A2**, considera que la economía mundial será muy heterogénea acentuándose la regionalización y la fragmentación. En este grupo de escenarios implica un crecimiento de la población mundial continuo durante el periodo, debido a que los indicadores regionales de fertilidad convergen muy lentamente. En esta familia de escenarios el crecimiento económico y el cambio tecnológico es más lento que en las demás categorías.
- La tercera categoría, **B1**, describe una economía global con un comportamiento similar a la categoría A1, en el sentido de que prevé convergencia económica a nivel global y que la población alcanza un máximo a mitad del siglo, pero con un rápido cambio estructural hacia una economía de la información y de servicios. En este escenario se considera que el mundo logra concentrarse en soluciones económicas, sociales y ambientales, lo que resulta en una mejora en la equidad.
- Finalmente, la cuarta categoría, **B2**, describe un mundo en que se buscan soluciones de forma local. La población crece continuamente a una tasa menor que el A2, se tienen niveles intermedios de desarrollo económico, y un desarrollo tecnológico menos rápido y más diverso que en las categorías B1 y A1. A pesar de que este escenario se orienta hacia la protección ambiental y la equidad social, lo hace a nivel local o regional, en contraste con soluciones globales.

Con estas categorías de supuestos sobre el desarrollo económico y social mundial, se elaboraron 40 escenarios de emisiones utilizando 6 modelos globales, los cuales desarrollan de forma desagregada distintas combinaciones de los supuestos dentro de cada familia sobre los principales determinantes económicos, demográficos y tecnológicos y aplican diversas técnicas de modelación económica y de los sistemas energéticos.

El IPCC ha decidido no asociar a los escenarios probabilidades de ocurrencia. Es decir, los científicos ponen a la disposición de la comunidad internacional, y particularmente a los tomadores de decisión, escenarios sobre el futuro desempeño de la economía y por tanto de las emisiones globales asociadas, pero no se pronuncian sobre cual escenario es preferible o más probable.

El IPCC en su Informe Especial sobre Escenarios de Emisiones no consideró políticas específicas de mitigación o adaptación al cambio climático, por lo que describen el futuro sin intervenciones de políticas para este problema¹¹. Las diferencias en los escenarios por tanto, se basan únicamente, en los supuestos sobre el comportamiento de la economía global y sus determinantes implícitos. Como es de esperarse de los supuestos económicos descritos en cada una de las categorías, los escenarios de emisiones resultantes divergen de forma considerable. El Gráfico 1 presenta un resumen sobre los distintos escenarios modelados con estos supuestos, que proviene del Informe especial del IPCC.

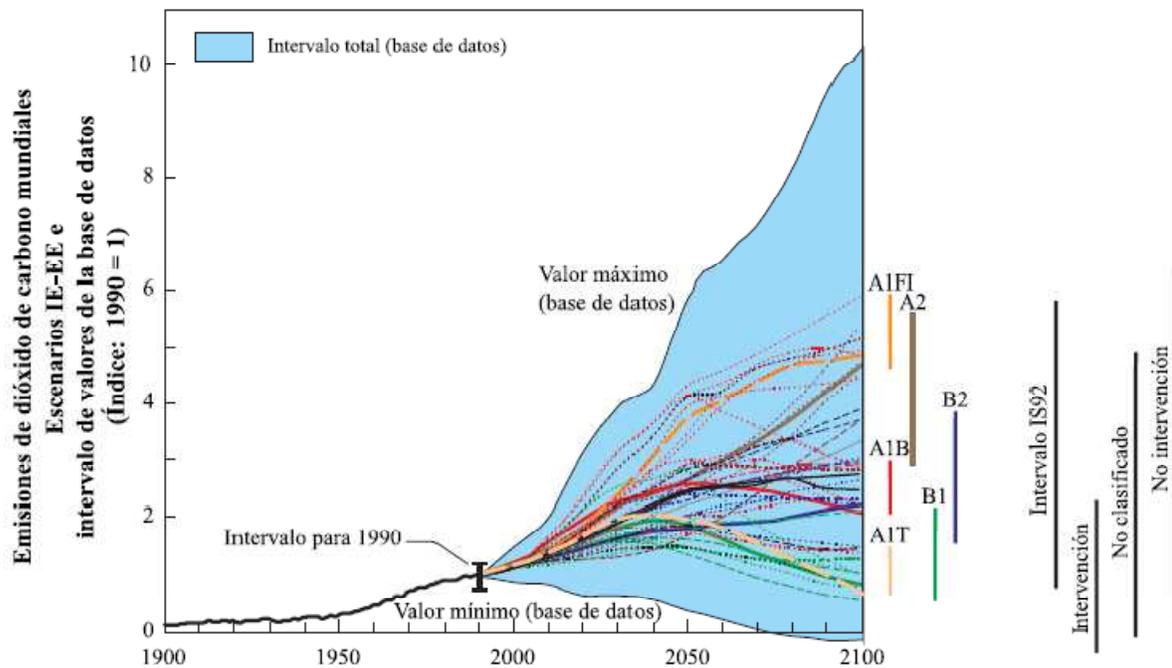


Figura 6. Escenarios de Emisiones Globales Relacionadas con el Sector Energía e Industria

Fuente: Nakicenovic, 2000. P, 7.

¹¹ Los nuevos escenarios consideran políticas para la estabilización.

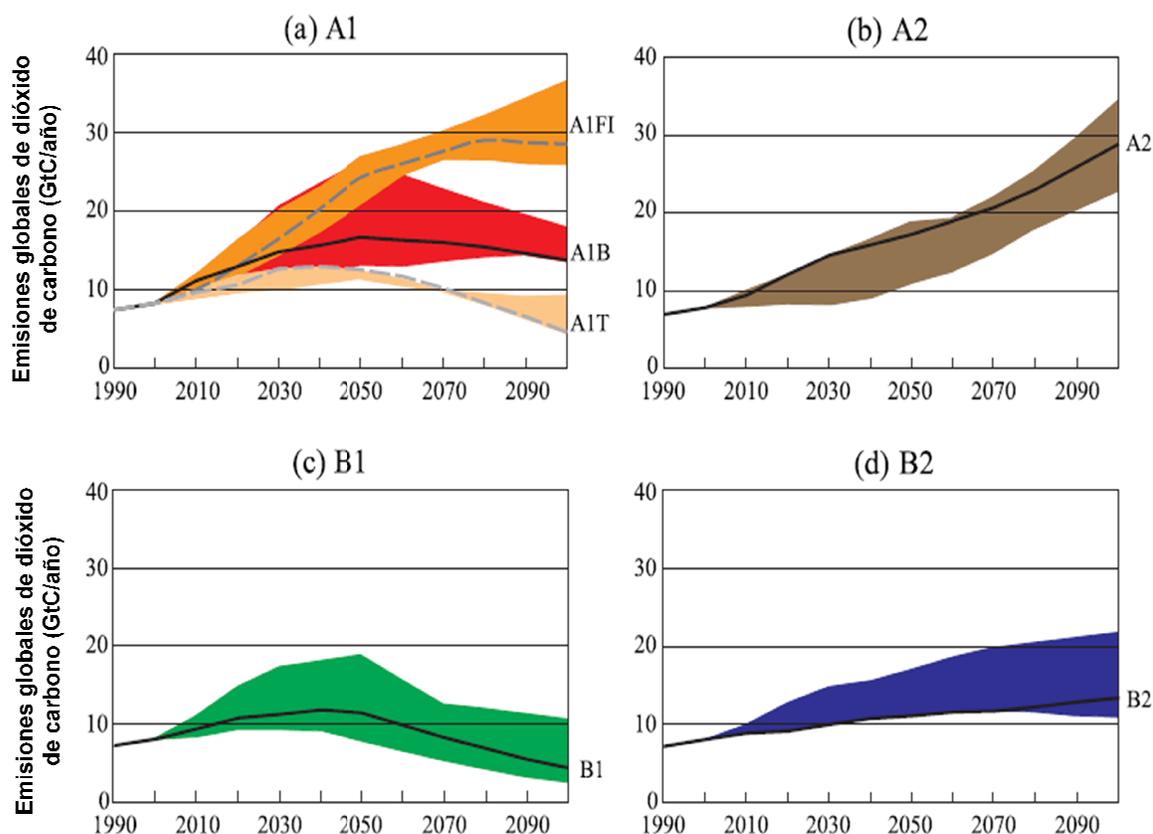


Figura 7. Emisiones Globales por Escenario

Fuente: Nakicenovic, 2000. P, 7.

A fin de ejemplificar las distintas variables económicas que se incluyeron en las modelaciones, el Gráfico 3 muestra un resumen de las principales variables determinantes del desarrollo económico que se utilizaron en la modelación de los distintos escenarios y de los supuestos en la modelación del componente sobre el desarrollo del sector energía.

Tabla 4. Variables socioeconómicas críticas en los distintos escenarios

Familia		A1			A2	B1	B2
Grupo de escenarios	1990	A1FI	A1B	A1T	A2	B1	B2
Intensidad energética final (10⁶J/dólares)^a	16.7						
2020		9.4 (8.5- 9.4)	9.4 (8.1-12.0)	8.7 (7.6-8.7)	12.1 (9.3 – 12.4)	8.8 (6.7-11.6)	8.5 (8.5-11.8)
2050		6.3 (5.4-6.3)	5.5 (4.4-7.2)	4.8 (4.2-4.8)	9.5 (7.0-9.5)	4.5 (3.5-6.0)	6.0 (6.0-8.1)
2100		3.0 (2.6-3.2)	3.3 (1.6-3.3)	2.3 (1.8-2.3)	5.9 (4.4-7.3)	1.4 (1.4-2.7)	4.0 (3.7-4.6)
Energía primaria (1018J/año)^a	351						
2020		669 (653-752)	711 (573-875)	649 (515-649)	595 (485-677)	606 (438-774)	566 (506-633)
2050		1434 (1377-1601)	1347 (968-1611)	1213 (913-1213)	971 (679-1059)	813 (642-1090)	869 (679-966)
2100		2073 (1988-2737)	2226 (1002-2683)	2021 (1255-2021)	1717 (1304-2040)	514 (514-1157)	1357 (846-1625)
Porción del carbón en la energía primaria (%)^a	24						
2020		29 (24-42)	23 (8-28)	23 (8-23)	22 (18-34)	22 (8-27)	17 (14-31)
2050		33 (13-56)	14 (3-42)	10 (2-13)	30 (24-47)	21 (2-37)	10 (10-49)
2100		29 (3-48)	4 (4-41)	1 (1-3)	53 (17-53)	8 (0-22)	22 (12-53)
Porción del carbón cero en la energía primaria (%)^a	18						
2020		15 (10-20)	16 (9-26)	21 (15-22)	8 (8-16)	21 (7-22)	18 (7-18)
2050		19 (16-31)	36 (21-40)	43 (39-43)	18 (14-29)	30 (18-40)	30 (15-30)
2100		31 (30-47)	65 (27-75)	85 (64-85)	28 (26-37)	52 (33-70)	49 (22-49)

Familia		A1			A2	B1	B2
Grupo de escenarios	1990	A1FI	A1B	A1T	A2	B1	B2
Población (en miles de millones)	5.3						
2020		7.6 (7.4-7.6)	7.4 (7.4-7.6)	7.6 (7.4-7.6)	8.2	7.6 (7.4-7.6)	7.6
2050		8.7	8.7	8.7	11.3	8.7 (8.6-8.7)	9.3
2100		7.1 (7.0-7.1)	7.1 (7.0-7.1)	7.0	15.1	7.0 (6.9-7.1)	10.4
PIB mundial (10¹²dólares de 1990/año)	21						
2020		53 (53-57)	56 (52-61)	57 (56-57)	41	53 (51-57)	51 (48-51)
2050		164 (164-187)	181 (164-181)	187 (182-187)	82	136 (134-166)	110 (108-111)
2100		525 (525-550)	529 (529-536)	550 (529-550)	243	328 (328-350)	235 (232-237)
Porción de ingresos por habitantes entre los países desarrollados más los países de economía en transición y los países en desarrollo	16.1						
2020		7.5 (6.2-7.5)	6.4 (5.2-7.5)	6.2 (6.2-6.4)	9.4 (9.4-9.5)	8.4 (5.3-8.4)	7.7 (7.5-8.0)
2050		2.8	2.8 (2.4-2.8)	2.8	6.6	3.6 (2.7-3.9)	4.0 (3.8-4.6)
2100		1.5 (1.5-1.6)	1.6 (1.5-1.7)	1.6	4.2	1.8 (1.6-1.9)	3.0 (3.0-3.5)

Fuente: Nakicenovic, 2000. P, 14 y 15.

Una vez explícitos los supuestos económicos, los escenarios de emisiones se elaboran utilizando modelos económicos globales para simular la economía. A continuación se describen los modelos utilizados por el IPCC en su Informe Especial ya que permiten entender cuáles son los distintos enfoques y elementos para la arquitectura de los modelos integrales de energía y cambio climático. Se precisa que actualmente existen más modelos los que se describen de forma genérica en el capítulo sobre actualización de escenarios y de forma detallada en el caso del modelo seleccionado para México en el último capítulo.

4.2. Modelos utilizados por el IPCC para Escenarios de Emisiones

El objetivo de describir los modelos utilizados por el IPCC en su Informe Especial sobre Escenarios de Emisiones, es el de presentar las potencialidades de los distintos enfoques de modelación de economía y cambio climático, así como el tipo de información requerida para su construcción. En términos generales, al igual que se describió en los modelos climáticos, el tipo de modelo a elegir es función de los objetivos específicos de los ejercicios de modelación. No existe un solo modelo idóneo, algunos proporcionan información más detallada, por ejemplo, del sector energía en un país o región, otros de las interacciones macroeconómicas a nivel internacional, etc.

El IPCC no recomienda un modelo sobre otro, sino que utilizó una selección de modelos representativa de distintos enfoques a fin de que los escenarios se encuentren en un rango que permita analizar las divergencias resultantes entre los distintos modelos.

4.2.1. MODELO AIM (ASIAN PACIFIC INTEGRATED MODEL)

Es un modelo desarrollado en Japón, participaron en su construcción el *National Institute for Environmental Studies*, el *Energy Research Institute* y *Kyoto University*. Evidentemente, este modelo cuenta con información detallada para analizar la región Asia-Pacífico pero contiene información global de regiones seleccionadas para analizar los intercambios internacionales. Es un modelo robusto de simulación de gran escala. Se compone de tres módulos principales: Módulo de emisiones de GEI (AIM/emissions), módulo de clima global (AIM/climate) y módulo de impactos (AIM/impact). En el módulo AIM/Emissions es donde se incorporan las variables socioeconómicas y tecnológicas, implementando tanto aproximaciones “top-down” como “bottom up” para el sector energía y de usos de suelo.

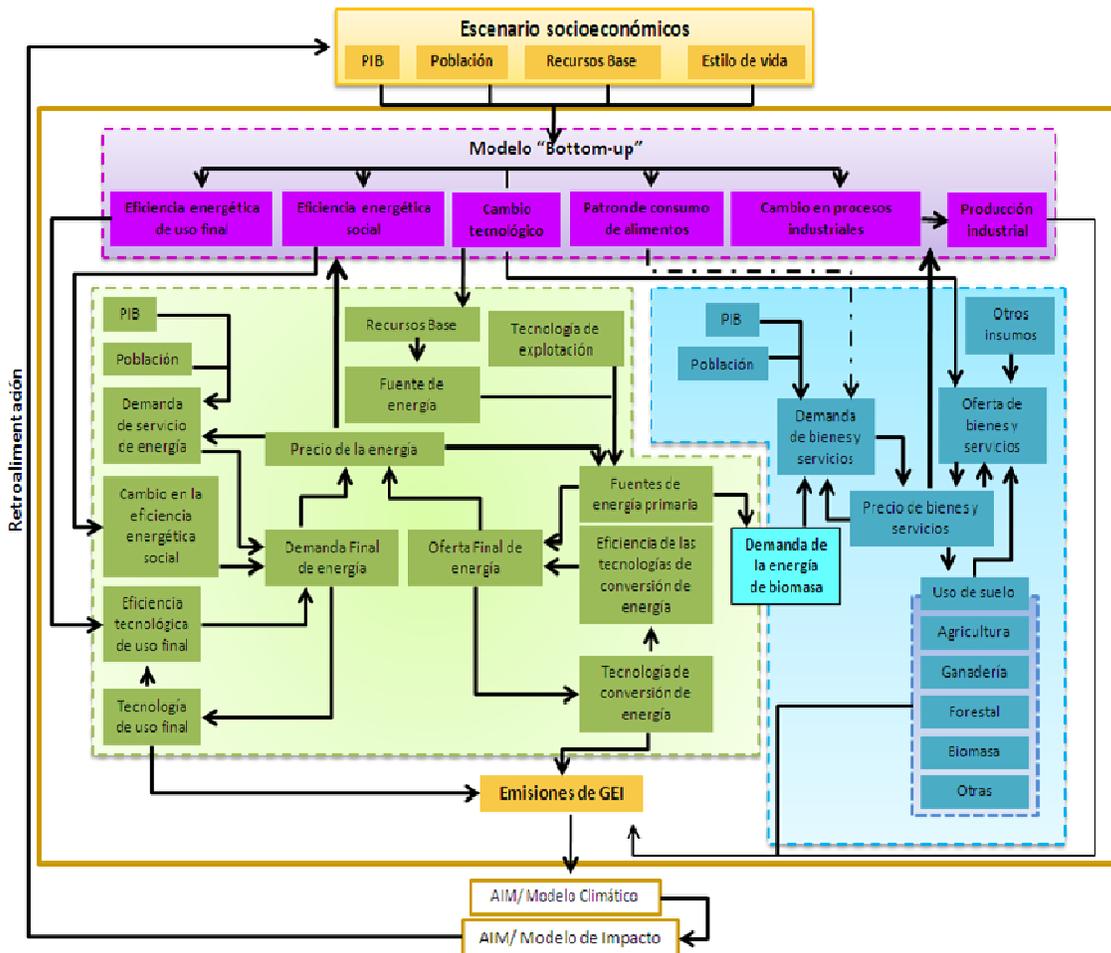


Figura 8. Sistema del Modelo AIM/Emissions-Linkage model

Fuente: IPCC¹² Special Report on Emissions Scenarios

Como se muestra en el Gráfico 4, el modelo AIM/Emissions-Linkage es un modelo con una especificación compleja. Por lo que hace al sector energía, tiene un sistema "bottom-up" para analizar usos finales de la energía, eficiencia energética, cambio tecnológico y sus enlaces con el sector alimentario, procesos industriales (energía secundaria) y usos industriales. También tiene un modelo "top-down" para el análisis económico del sector energía, el cual consiste en una adaptación del conocido modelo Edmonds-Reilly-Barns (ERB). Dicho modelo es uno de equilibrio parcial macroeconómico de pronóstico de demanda que utiliza como parámetros fundamentales el crecimiento de la población y del PIB, así como los balances de energía. En particular, el modelo "bottom-up" para usos finales de la energía (AIM/Enduse model) se vinculó con el top-down a fin de obtener el análisis de mayor detalle posible para la región Asia-Pacífico (en particular China, India,

¹² http://www.grida.no/publications/other/ipcc_sr/?src=/climate/ipcc/emission/index.htm

Japón e Indonesia) y la tendencias para el uso de la energía hasta 2030, mientras que las demás regiones se modelaron de forma simplificada.

El modelo está dividido en 9 regiones: Estados Unidos, Europa Occidental, otros países de la OCDE incluyendo a Canadá, OCDE en el pacífico, Europa Oriental y países de la antigua Unión Soviética, Economías planificadas de Asia y China, Sur y Sureste Asiático, Medio Oriente, África y Centro y Suramérica. Este modelo no contiene ningún desglose de la economía mexicana.

El periodo de simulación fue 1990 a 2100, en intervalos de 5 años hasta el 2030 y un análisis al 2050, 2075 y 2100. Las emisiones de gases de efecto invernadero consideradas son CO₂, N₂O, CO, NO_x, y CH₄. Debido al impacto del SO₂, tanto por sus efectos locales como en el clima global, este contaminante también se incluyó. El modelo permite realizar análisis de políticas y escenarios con intervenciones.

4.2.2. MODELO ASF (THE ATMOSPHERIC STABILIZATION FRAMEWORK MODEL)

El modelo ASF fue desarrollado por la empresa consultora *ICF Consulting Group* para la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. Este modelo equilibra la demanda y oferta de energía a través del sistema de precios de los energéticos, el cual varía por región para reflejar las condiciones fragmentadas del mercado, y por tipo de tecnología para reflejar las restricciones a la oferta, los costos de conversión y el valor de la energía en usos finales. Utiliza una técnica de equilibrio iterativo para determinar los precios por el lado de la oferta. Dichos precios en cada región se utilizan para estimar los precios secundarios de la oferta de exportación marginal por región, los costos de transporte interregionales, de refinación, de distribución y las políticas fiscales regionales.

Para el caso del sector eléctrico, los precios secundarios reflejan la relación de cada uno de los combustibles utilizados en la generación, los precios secundarios de dichos combustibles, costos de operación y mantenimiento, y la eficiencia de conversión.

El modelo estima la producción agrícola por productos principales tales como carne, leche y granos, la cual se deriva utilizando los supuestos poblacionales y de crecimiento económico. El ASF tiene un módulo que utiliza esta información para estimar las áreas deforestadas anualmente como una función de dichas demandas de productos agrícolas y del crecimiento de la población.

Con los resultados del sector energía, agrícola y forestal, el ASF estima las emisiones y las proyecta utilizando la información de crecimiento del PIB regional y de las determinantes descritas en cada categoría de escenarios de modelación que sean relevantes para cada sector. Por ejemplo, en el caso de las emisiones de metano se considera que los rellenos sanitarios crecen considerando el aumento de la población, las emisiones sectoriales de cemento se mapean utilizando la información sobre PIB, etc.

La desagregación del ASF es de 9 regiones que incluyen: África, las economías asiáticas centralmente planificadas (China, Laos, Mongolia, Corea y Vietnam); Europa del este (Albania, Bulgaria, República Checa, Hungría, Polonia, Rumania y la antigua Unión Soviética); América Latina (**México**, América Central y Suramérica); el Medio Oeste (Irán, Irak, Kuwait, Qatar, Arabia Saudita y la Unión de Emiratos); los países OCDE del este (Australia, Japón, Nueva Zelandia); OCDE Oeste (Austria, Bélgica, Canadá, Dinamarca, Finlandia, Francia, Alemania, Grecia, Islandia, Irlanda, Italia, Luxemburgo, Holanda,

Noruega, Portugal, España, Suecia, Suiza, Turquía y el Reino Unido) Sureste de Asia y Oceanía (Afganistán, Bangladesh, Bhutan, India, Indonesia, Malasia, Corea, Burma, Pakistán, Filipinas, Singapur, Tailandia y otros países de la región); Estados Unidos. Se destaca que este modelo incluye México de forma separada.

4.2.3. MODELO IMAGE (INTEGRATED MODEL TO ASSESS THE GREENHOUSE EFFECT)

El modelo IMAGE fue desarrollado en Europa por el instituto holandés de estudios ambientales *National Institute of Public Health and the Environment*. El sistema de modelos IMAGE consiste de tres modelos interconectados el Sistema de Energía e Industria (EIS), el Sistema de Medio Ambiente Terrestre (TES) y el Sistema de Interacción Atmósfera-Océano (AOS). La evaluación de escenarios económicos se integra en el EIS y en la modelación de cambios de uso de suelo derivados del crecimiento económico y consecuente incremento del sector agrícola.

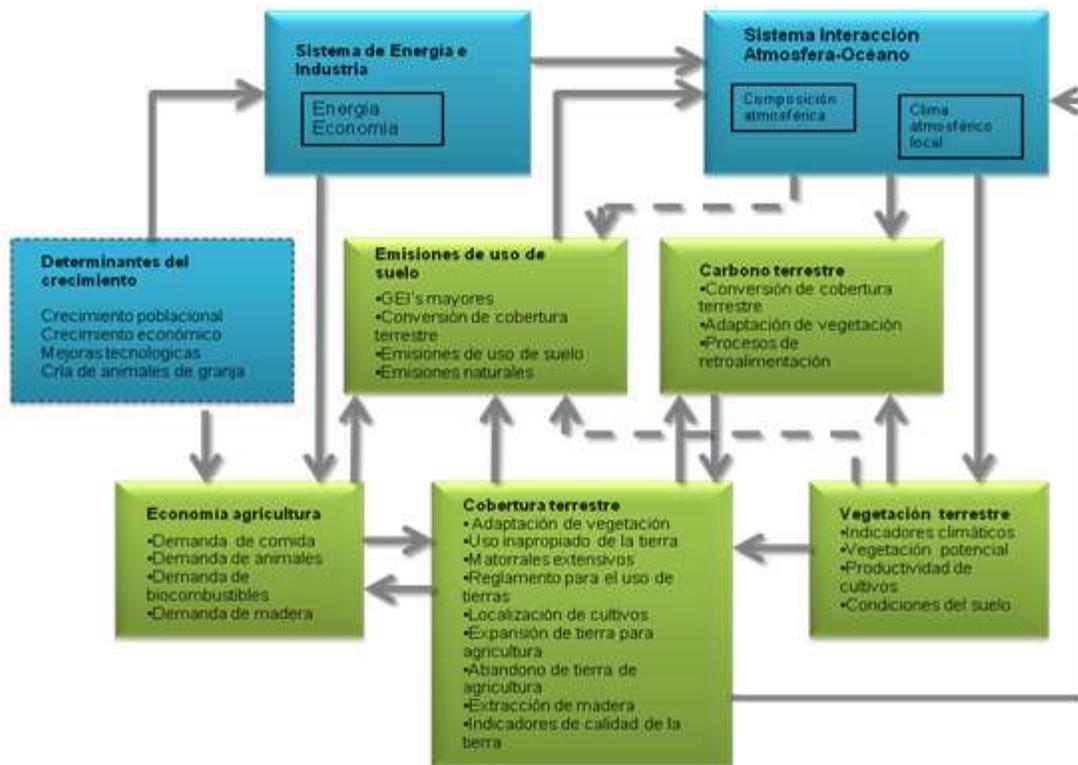


Figura 9. Estructura del Modelo IMAGE

Fuente: IPCC13 Special Report on Emissions Scenarios

¹³ http://www.grida.no/publications/other/ipcc_sr/?src=/climate/ipcc/emission/index.htm

Por lo que hace al sector energía las emisiones se modelan utilizando el submodelo TIMER (Targets Image Energy Regional). Es un sistema dinámico que simula el sistema energético mundial a un nivel de desagregación intermedia. Representa 17 regiones para modelar en el largo plazo la dinámica de los sistemas energéticos considerando el ahorro de energía y la transición hacia combustibles no fósiles y estima las trayectorias de los gases de efecto invernadero. México no se analiza de forma separada, y se incluye dentro de la región América Latina.

El modelo TIMER es un modelo de simulación y no un modelo de optimización. Es decir, no optimiza un escenario considerando información perfecta en el futuro. En su lugar, TIMER estima año con año las decisiones de inversión en base a una combinación de datos provenientes de sus módulos sobre ingeniería del sistema con un enfoque “bottom-up” y reglas sobre el comportamiento de los inversionistas, la sustitución de combustibles y tecnologías.

El modelo fue calibrado para reproducir las principales tendencias energéticas mundiales durante el periodo 1971-1995. Las salidas proveen información detallada sobre la intensidad energética, los costos de los combustibles y sobre la oferta de tecnologías renovables que se desarrolla en el tiempo, así como las emisiones estimadas.

El modelo TIMER considera los siguientes aspectos:

- Demanda de energía útil en dos formas (electricidad y no eléctrica) en cinco sectores, cambio económico estructural debido de cambios inter e intrasectoriales, cambios en la intensidad energética tanto autónomos como inducidos por cambios en precios para considerar el ahorro de energía, mejoras en la eficiencia energética y aumentos en la productividad energética.
- Exploración y producción de combustibles fósiles, incluyendo las dinámicas de agotamiento y aprendizaje.
- Penetración en el mercado de la biomasa como sustituto del petróleo y gas, considerando los costos relativos y el aprendizaje.

Las principales variables exógenas al modelo son la población regional y los indicadores macroeconómicos de actividad regional. Los principales supuestos del modelo se refieren al desarrollo de la intensidad energética (cambio estructural, cambio autónomo en el mejoramiento de la eficiencia energética y respuesta a cambios en precios), desarrollo tecnológico (curvas de aprendizaje), disponibilidad de recursos, preferencias sobre los combustibles y restricciones al comercio de combustibles, controles de final de tubo para las emisiones de gases, uso de portadores de energía primarios y secundarios y de stocks de reserva, producción de combustibles, emisiones del sector energía e industriales, de dióxido de azufre, precursores de halo carburos, demanda de biocombustibles modernos y tradicionales.

Los aspectos no incorporados en el modelo son la retroalimentación de problemas temporales de suministro de energía a un nivel macroeconómico de actividad, la retroalimentación de los precios de la energía a un nivel macroeconómico, interacciones macroeconómicas relacionadas con los flujos de dinero provenientes de impuestos (incluyendo los impuestos al carbono), la retroalimentación de las políticas de control de emisiones en el nivel final de emisiones, y los aspectos institucionales consecuencia de privatizaciones y liberalización de los mercados eléctricos.

El modelo consiste de seis submodelos: el modelo de demanda energética, modelo de generación de electricidad, modelo de combustibles fósiles, modelo de emisiones del sector energía e industrial.

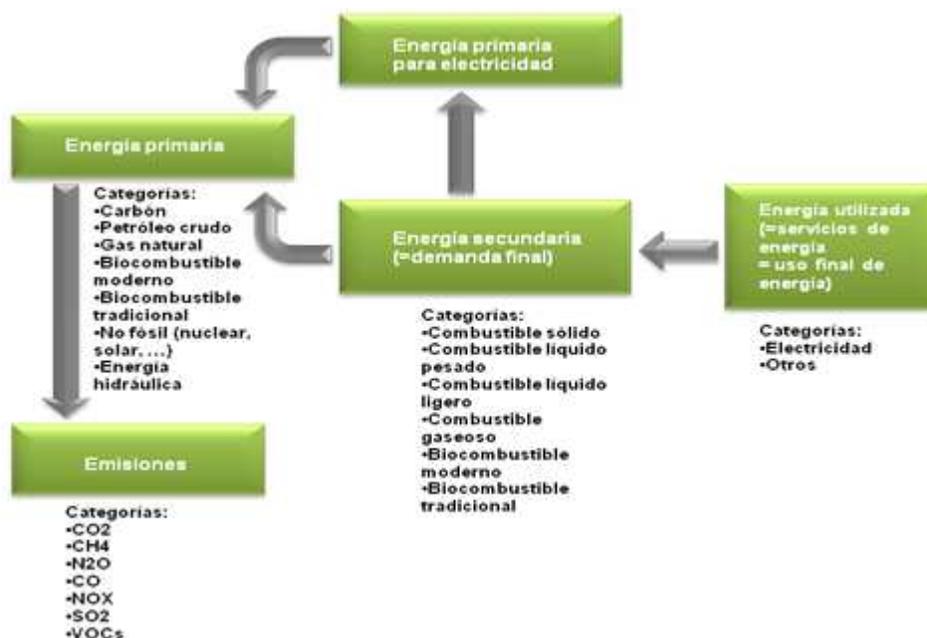


Figura 10. Modelo TIMER (integrado al IMAGE)

Fuente: De Vries et al (2001)

4.2.4. MODELO MESSAGE (MODEL FOR ENERGY SUPPLY STRATEGY ALTERNATIVES AND THEIR GENERAL ENVIRONMENTAL IMPACT)

El modelo MESSAGE¹⁴ forma parte del sistema de modelos¹⁵ desarrollados por el International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA, Instituto Internacional para el Análisis Aplicado de Sistemas) que es un instituto reconocido a nivel internacional por la calidad de su investigación aplicada a los sistemas energéticos. El MESSAGE se alimenta de los otros modelos de IIASA para obtener como resultado los escenarios de emisiones.

¹⁴ Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact, <http://www.iiasa.ac.at/Research/ECS/docs/models.html>

¹⁵ El Sistema de Modelos IIASA-ESC incluye, en adición al modelo MESSAGE, Modelos para la generación de escenarios (SG), para el análisis macroeconómico (MACRO), para el impacto climático (MAGICC), para las decisiones de investigación y desarrollo (ERIS) para evaluar el impacto de políticas de mitigación regionales y globales y para la evaluación de prioridades (ISPA).

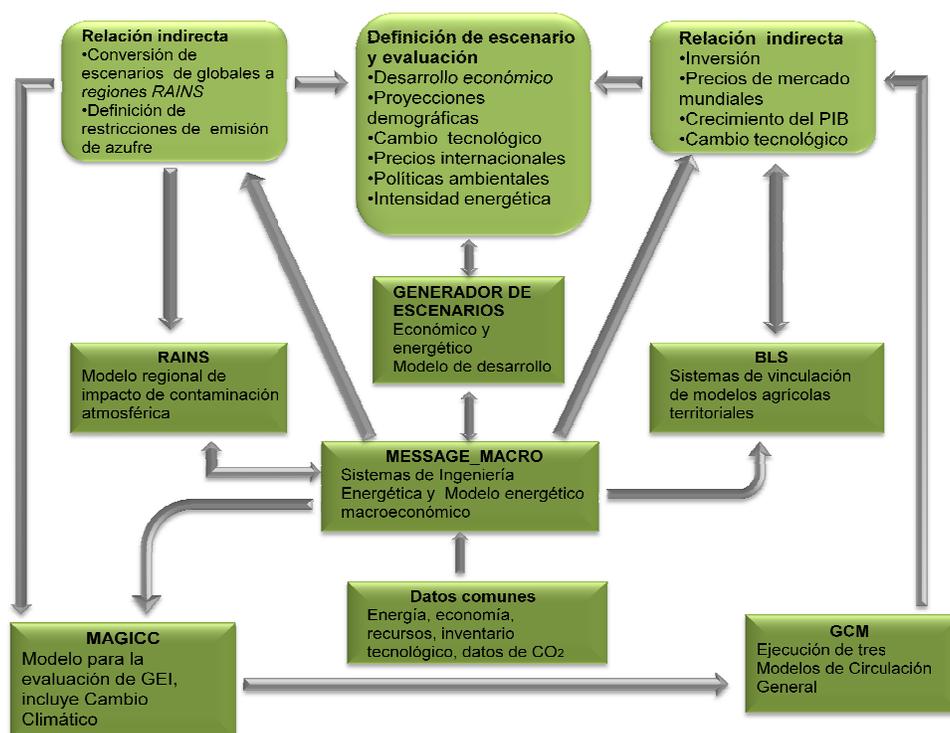


Figura 11. Sistema de Modelos de IIASA

Fuente: IPCC¹⁶. Special Report on Emissions Scenarios

El MESSAGE es un modelo de optimización de mediano y largo plazo para la planeación energética; permite simular los sistemas energéticos analizando detalladamente las interdependencias desde la extracción de recursos, importación y exportación, conversión, transporte y distribución, hasta la de servicios energéticos tales como la iluminación, procesos industriales, transporte, etc.

Incluye 11 regiones macro para la parte global (**México** no se modela de forma detallada y se encuentra englobado en la región “Latinoamérica y el Caribe”). Los escenarios se estiman aplicando una función de minimización de costos bajo restricciones sobre el sistema energético. El modelo estima la evolución del sistema, considerando la demanda estimada de energía, para periodos de una década. Determina la capacidad a instalar, insumos y producción de energía, requerimientos energéticos en varios puntos del sistema, costos, emisiones, etc.

El grado de detalle en la representación de las tecnologías en el sistema energético es flexible, en función de los periodos y ámbito geográfico que se pretende analizar. Se debe especificar un sistema de referencia, incluyendo las características de desempeño de un conjunto dado de tecnologías, que considera todas las posibles cadenas que se pueden utilizar. Al correr el modelo se estiman la cantidad de recursos y las tecnologías necesarias para satisfacer demandas energéticas específicas.

¹⁶ http://www.grida.no/publications/other/ipcc_sr/?src=/climate/ipcc/emission/

La última versión del modelo es MESSAGE IV. Dicha versión permite obtener información sobre usos domésticos, importación y exportación de energía, flujos relacionados con el comercio, requerimientos de inversión, los tipos de tecnologías de producción y conversión (sustitución de tecnologías), emisiones, procesos de sustitución entre combustibles, así como trayectorias de energía primaria, secundaria, final y útil. Adicionalmente, el modelo ha sido actualizado para incluir el aprendizaje endógeno para varias tecnologías, utilizando el enfoque de programación integral mixta.

4.2.5. MODELO MARIA (MULTIREGIONAL APPROACH FOR RESOURCE AND INDUSTRY ALLOCATION MODEL)

El modelo MARIA es un modelo de valoración integrada que evalúa las interrelaciones entre la economía, la energía, los recursos, el uso de suelo y el cambio climático. El modelo original en el que está basado es el Modelo Dinámico de Cambio Climático y Economía (DICE) desarrollado originalmente por Nordhaus. Es un modelo de optimización lineal inter-temporal que relaciona el comercio internacional considerando 8 regiones: América del Norte (Estados Unidos y Canadá), Japón, otros países de la OCDE, China, países asiáticos (Indonesia, Malasia, Filipinas, Singapur, República de Corea, Tailandia) y África y América Latina. México no se analiza de forma detallada y se incluye dentro de América Latina.

El modelo evalúa con un enfoque “top-down” macroeconómico el desarrollo de políticas energéticas y de políticas climáticas. Aplica una función de producción del tipo CES (elasticidades de sustitución constantes) con el stock de capital, trabajo, electricidad y sector no eléctrico para las regiones mencionadas. El modelo energético evalúa la energía primaria de recursos fósiles, biomasa, energía nuclear, energías renovables (hidráulica, solar, eólica y geotermia). Además de los flujos de energía, el modelo incluye un módulo simplificado para evaluar usos de suelo considerando la producción de alimentos y la potencial contribución de la biomasa. Considera en las opciones tecnológicas el secuestro de carbono y el ciclo de vida de combustible en la energía nuclear. Las demandas de energía en el modelo se agregan en sector industrial, transporte y otros usos.

Los costos de la energía se dividen en costos de producción y de utilización. Los precios de mercado se determinan de manera endógena en el modelo utilizando precios sombra. Evidentemente, los costos asociados a la extracción de combustibles y los costos de conversión son los coeficientes más importantes en la determinación de la mezcla energética, y consecuentemente de las emisiones.

La versión del modelo MARIA-8 asume por simplicidad una función de producción cuadrática para interpolar las relaciones agregadas entre los recursos fósiles y los costos de extracción. Los costos de conversión se tomaron del modelo GLOBAL 2100. Los precios internacionales se determinan utilizando multiplicadores de Lagrange derivados de las restricciones del modelo y utilizando la técnica de ponderación de Negishi a fin de definir el precio internacional de equilibrio de los bienes intercambiados bajo restricciones de presupuesto.

El modelo de usos de suelo estima la demanda de alimentos en función de la demanda calorífica per capita directa. Los bosques se tratan como una fuente de biomasa y de productos de madera, y se considera su función de secuestro de carbono. A pesar de ser un modelo simplificado en cuanto al tratamiento del modelo físico, los resultados permiten

contar con perfiles de largo plazo de la mezcla de combustibles y resultados del comercio internacional en varios escenarios. La Figura 12 presenta esquemáticamente el modelo.

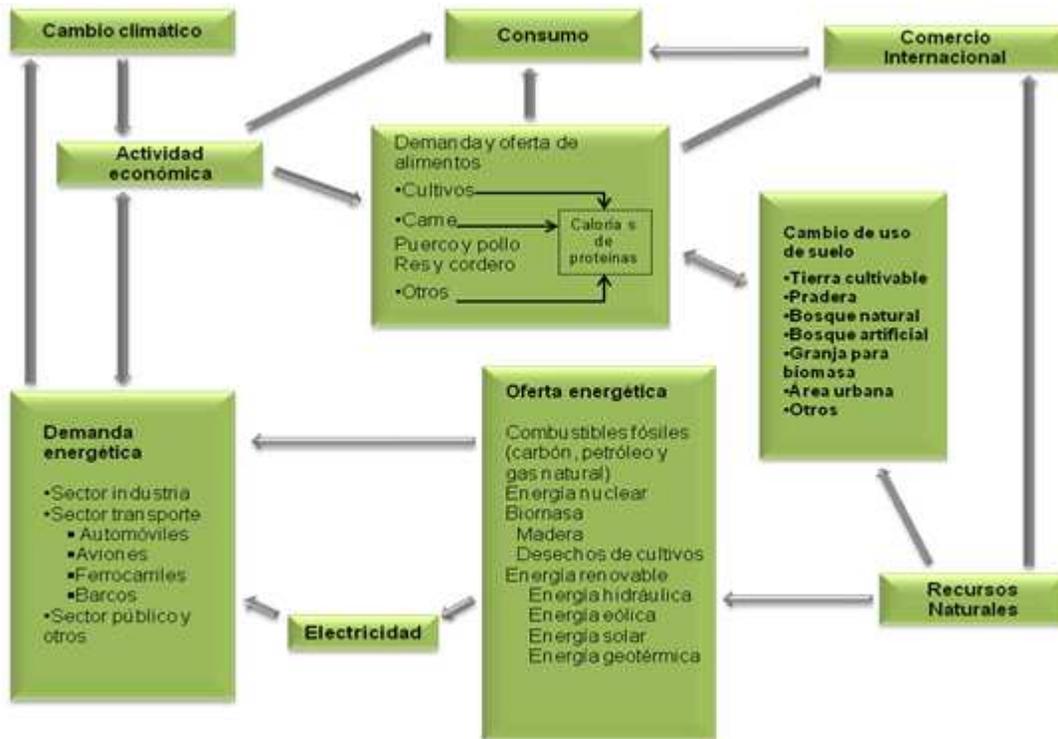


Figura 12. Esquema del modelo MARIA
 Fuente: IPCC. Special Report on Emissions Scenarios

4.2.6. MODELO MINI CAM (MINI CLIMATE ASSESSMENT MODEL)

El modelo MiniCAM es un modelo de valoración integrada desarrollado por el Pacific Northwest National Laboratory (PNNL) de los Estados Unidos en coordinación con la Universidad de Maryland. El modelo estima las emisiones globales aplicando el marco del modelo ERB¹⁷ y un modelo de usos de suelo en el que se modela la agricultura y el sistema forestal. El componente físico lo obtiene de utilizar el modelo MAGICC¹⁸ y el modelo SCENGEN para estimar los cambios regionales. Las funciones de daños del daño climático son incorporadas al modelo de estudios relevantes.

El MiniCAM tiene once regiones: Estados Unidos, Canadá, Europa Occidental, Japón, Australia, Europa del Este y países de la antigua Unión Soviética, países centralmente planificados de Asia, Sur y Sureste asiático, Medio Oriente, África y Latinoamérica. México no se analiza de forma separada y se incluye solamente en Latinoamérica.

¹⁷ El ERB es un modelo de equilibrio parcial que equilibra la demanda y oferta de energía en siete grandes categorías (carbón, petróleo, gas, nuclear, hidro, solar y biomasa) en once regiones. Es el mismo enfoque utilizado en el modelo AIM.

¹⁸ Wigley and Raper, 1993

La productividad laboral es estimada de forma agregada considerando la población mundial. El producto interno bruto se corrige considerando el impacto en cambios en los precios de los energéticos, utilizando la elasticidad-precio de los energéticos. El modelo considera análisis demográficos para estimar la población en edad de trabajar de forma inter-temporal y con ella se modela la evolución de la productividad en el largo plazo.

La demanda de energía se estima en tres categorías: residencial/comercial, industrial y transporte como una función del precio y el ingreso. Los servicios de energía se determinan en cuatro categorías de combustibles (sólidos, líquidos y gaseosos) y electricidad. La demanda de estos combustibles se determina en función de sus costos relativos y de la evolución de las tecnologías de uso final, lo cual se modela considerando el mejoramiento de la eficiencia energética en el tiempo. La demanda primaria de combustibles se determina considerando el costo relativo de su transformación en combustibles secundarios. Se considera que la energía nuclear, solar e hidráulica se consume directamente por el sector eléctrico, mientras que el carbón y la biomasa pueden transformarse en gas y combustibles líquidos si el petróleo y el gas se encarecen o se agotan. El modelo también incorpora la posibilidad de usar hidrógeno, ya sea en la generación de electricidad o como combustible para los tres sectores de demanda final.

4.3. Foros Internacionales de análisis de modelos para la actualización de los Escenarios de Emisiones del IPCC

Como se mencionó, después de la publicación del Informe Especial de Escenarios de Emisiones ha habido avances considerables en la modelación de impactos económicos del cambio climático y de elaboración de escenarios de emisiones, tanto a nivel global como para desarrollar estrategias nacionales de mitigación de emisiones. El Cuarto Informe del IPCC presentó en los resultados del Grupo 3 de Mitigación, los principales avances en las investigaciones. Entre ellos se encuentran de forma relevante los esfuerzos del Foro de Modelación Energética auspiciado por la Universidad Stanford (EMF, Energy Modelling Forum) y el Proyecto Comparativo de Modelación de la Innovación (Innovation Modelling Comparison Project, IMCP) coordinado por Cambridge University, en el Reino Unido.

Los resultados de los foros se discuten brevemente a continuación y posteriormente, se describen los esfuerzos actuales para coordinar los esfuerzos modelísticos, de tal forma que se cuenten con nuevos escenarios que puedan ser incorporados en un Quinto Informe del IPCC, cuya fecha está próxima a ser anunciada. Esta literatura se conoce en la comunidad modelística como post-SRES ya que se refiere a las modelaciones realizadas después del Informe Especial de Emisiones del IPCC. El objetivo último es considerar en la elección del modelo global aplicable a México, los últimos avances científicos y las variables críticas que los grupos de modelación a nivel internacional han encontrado en dichos esfuerzos coordinados.

En particular, el Cuarto Informe del IPCC analiza los resultados del proyecto conocido como EMF21 (Estudio número 21 del EMF, que incluyó la revisión de 19 grupos de modelación integrada de cambio climático) y los resultados del análisis de la modelación de la innovación tecnológica en los modelos económicos (resultados del IMCP).

Un punto importante a considerar, sin embargo, es que debido a que estos escenarios post-SRES fueron realizados por equipos de modelación independientes existen, en estricto sentido, problemas para realizar un análisis comparativo similar al realizado en el

Informe Especial de Emisiones, toda vez que los supuestos socioeconómicos para la modelación no han sido armonizados. Es por ello que el IPCC ha iniciado un esfuerzo coordinado a través de su Comité para Nuevos Escenarios para que la comunidad científica pueda elaborar escenarios con criterios comunes y transparentes.

4.3.1. RESULTADOS DEL FORO DE MODELACIÓN ENERGÉTICA

El proyecto EMF21 fue coordinado por el Foro de Modelación Energética de la Universidad de Stanford. Dicho Foro fue constituido en 1976 y desde entonces realiza análisis comparativos de modelos económicos del sector energía. En este caso particular, realizó un análisis comparativo de modelos que analizan la interrelación entre la economía y el cambio climático, fundamentalmente con el objetivo de analizar el efecto de incluir múltiples gases en las políticas de mitigación de corto y largo plazo. Un reto fundamental en este esfuerzo fue el de considerar las emisiones provenientes del cambio de uso de suelo¹⁹.

Como se mencionó, cada grupo de modelación elaboró su escenario base. Sin embargo, a fin de evaluar políticas de mitigación de mediano plazo (2030 y 2050), se aplicó comúnmente el modelo EPPA del MIT y el MiniCAM a fin de determinar objetivos de reducción consistentes con metas de estabilización. La lista de los modelos considerados en el EMF21 se muestra en el Cuadro 1. Los resultados de los modelos de escenarios de emisiones de los modelos se presentan en la Figura 13; por lo que hace a los resultados de evaluar políticas de mitigación multi-gases se presentan en la Figura 14 que muestra el análisis comparativo con políticas de mitigación que consideran únicamente como objetivo el CO₂.

Tabla 5. Modelos evaluados en el EMF21

Modelo	Grupo de Modelación
AIM	J. Fujino, R. Nair, M. Kainuma, T. Masui y Y. Matsuoka (National Institute for Environment Studies, Japan) (Kyoto University, Japón)
AIM/EU-India	P.R. Shukla (Indian Institute of Management), A. Garg (UNEP/RISO), M. Applied to India Kapshe (Maulana Azad Inst. of Tech.), y R. Nair (NIES, Japón)
AMIGA	D. Hansen (Argonne National Laboratory) y J. Laitner (U.S. EPA), Estados Unidos
COMBAT	H.A. Aahaim, J.S. Fuglestvedt, and O Godal. CICERO, Noruega
EDGE	J. Jensen (TECA TRAINING ApS)
EPPA	J. Reilly, M. Sarofim, S. Paltsev, R. Prinn (Massachusetts Institute of Technology, Estados Unidos)

¹⁹ Weyant, J.P., De la Chesnaye, F.C., Blanford, G. Overview of EMF-21: multigas mitigation and climate policy (2006) Energy Journal, (SPEC. ISSUE), pp. 1-32.

Modelo	Grupo de Modelación
FUND	Richard Tol (Economic and Social Research Institute, Ireland and Hamburg, Uncertainty, Negotiation, Vrije & Carnegie Mellon Universities)
GEMINI-E3/GEMWTrap	A. Bernard (Min. of Equipment, General Equilibrium Model of Transport, and Housing, France), M. International Interaction Vielle (CEA-LERNA, France), y L. Viguier (HEC Geneva y Swiss Federal Environment Institute of Technology)
GRAPE	A. Kurosawa (Institute of Applied Global Relationship Energy, Japón)
GTEM	G. Jakeman and B. Fisher (Australian Bureau of Agricultural and Resource Model Economics)
IMAGE	D.P. van Vuuren, B. Eickhout, P.L. Lucas y M.G.J. den Elzen (National Institute The Global Environment for Public Health and the Environment, The Netherlands)
IPAC	K. Jiang, X. Hu, & S. Zhu (Energy Integrated Projection Research Institute, China)
MERGE	A. Manne (Stanford University, Estados Unidos.) y R. Richels (Electric Power Research Regional and Global Effects Institute, Estados Unidos)
MESSAGE	S. Rao and K. Riahi (International Institute for Applied Systems Analysis, Austria)
MiniCAM	S. Smith (PNNL/Univ. Maryland, Estados Unidos) y T.M.L. Wigley (National Center for Model Atmospheric Research, Estados Unidos)
PACE	C. Bohringer, (University of Heidelberg), A. Löschel (Centre for European Economic Research--ZEW y T. Rutherford (University of Colorado)
POLES-GECS	P. Criqui (Institute of Energy Policy and Economics, Francia), Peter Russ (EC-- Institute for Prospective Technological Studies, España), y Daniel Deybe (EC Environment DG)
SGM	A. Fawcett (U.S. EPA) and R. Sands (PNNL/Univ. Maryland, Estados Unidos)
WIAGEM	C. Kemfert (German Inst. of Economic Research & Humboldt University), T. P. Truong (Univ. of New South Wales, Australia) and T. Bruckner (Institute for Energy Engineering, Tech University, Germany)

Fuente: Weyant (2006)

Los modelos desarrollados en Estados Unidos considerados en el EMF21, con mayor detalle en la modelación de la región norteamericana, son el AMIGA, el EPPA y el modelo MERGE. De estos tres, el modelo EPPA contiene una desagregación para México. Como se muestra en las gráficas el rango de resultados del modelo EMF21 es consistente con los resultados de los escenarios base del IPCC para prácticamente todas las familias de escenarios con excepción de la familia B1. Esta conclusión se presentó en el Cuarto Informe del IPCC. De forma destacada, el EMF21 permitió concluir que las estrategias de mitigación multi-gases son determinantes para las distintas estrategias de estabilización. La Figura 14 muestra las distintas trayectorias que estiman los modelos considerando múltiples gases en las estrategias de mitigación.

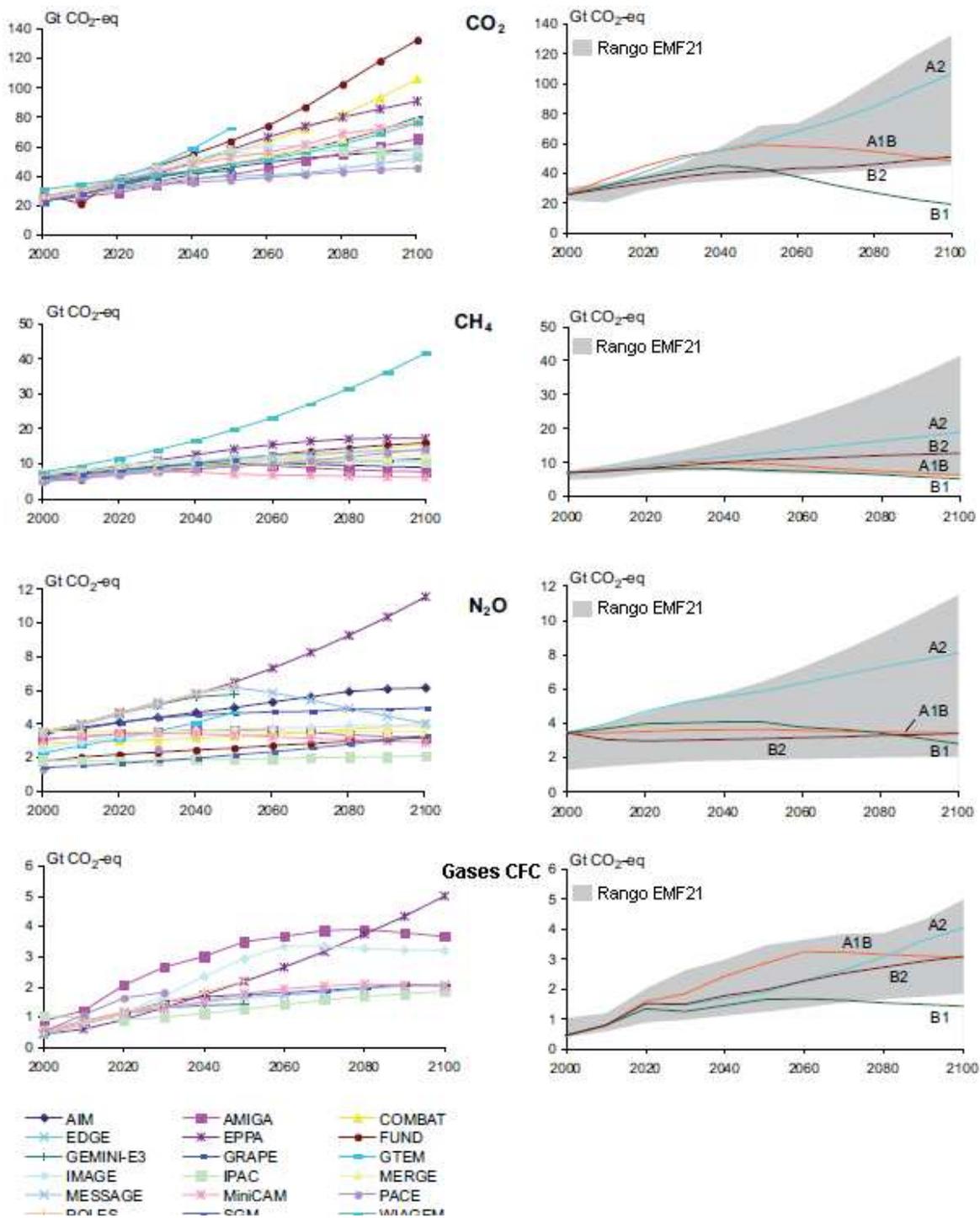


Figura 13. Escenarios de Emisiones de Línea Base estimados por los Modelos del EMF21 y Comparación con los Escenarios de Emisiones del IPCC

Fuente: Fisher (2007), IPCC Fourth Assessment Report, p. 191

4.3.2. RESULTADOS FORO DE ANÁLISIS DE INCORPORACIÓN DE LA INNOVACIÓN TECNOLÓGICA EN LOS MODELOS DE ECONOMÍA Y CAMBIO CLIMÁTICO

Los resultados de los modelos de economía y cambio climático son sumamente sensibles a los supuestos que se hagan sobre el desarrollo tecnológico en el largo plazo. Por su relevancia, la Universidad de Cambridge coordinó los trabajos de distintos grupos a nivel internacional que han incorporado de forma endógena²⁰ el cambio tecnológico a los modelos para evaluar políticas de mitigación del cambio climático, a fin de evaluar los avances en la materia. Dicho Foro es conocido como IMPC por sus siglas en inglés (Innovation Modelling Comparison Project o Proyecto Comparativo de Modelación de la Innovación). El análisis del cambio tecnológico ha sido siempre una variable compleja desde el punto de vista de los modelos de crecimiento económico²¹. Los modelos que incorporan el cambio tecnológico de forma endógena son relativamente recientes. En un inicio, a principios de los 90s, los modelos utilizaban supuestos exógenos para modelar el cambio tecnológico.

Por ejemplo, en los modelos “top-down” el cambio tecnológico se modela haciendo ciertas consideraciones sobre las elasticidades de sustitución entre las fuentes de energía fósil y las fuentes no fósiles y el parámetro de mejora en la eficiencia energética se establecía de forma autónoma para establecer un supuesto sobre el desacoplamiento del crecimiento económico y las emisiones (reducciones en la intensidad energética). Es decir, usualmente se incorpora únicamente un parámetro autónomo para incorporar la relación entre la economía y la energía, por lo que hace al desarrollo y difusión de tecnologías por el lado de la demanda. Por su parte los modelos “bottom-up” que representaban el sistema energético completo, asumían parámetros autónomos sobre la escala de la demanda de energía y de los costos de la tecnología²².

Durante los 90’s, se desarrollaron fundamentalmente dos enfoques para la incorporación del cambio tecnológico. Los modelos “top-down” buscaron introducir funciones de forma explícita que incorporaran la generación de conocimiento y ecuaciones para incorporar los efectos de “aprender al hacer” (LbD o learning by doing). Por su parte, los modelos “bottom-up” se enfocaron en desarrollar “curvas de aprendizaje tecnológico” que son funciones que relacionan la escala de uso de una tecnología específica con potenciales reducciones en los costos de dichas tecnologías.

Las dos líneas de análisis llegaron a conclusiones divergentes. Por un lado, los modeladores de la macro-economía²³ describieron que si bien el avance en la tecnología de bajo carbón traería beneficios en la mitigación, dadas las interrelaciones de la economía, las inversiones en tecnologías de bajo carbón podrían darse a expensas de avances tecnológicos en otros sectores de la economía (ya que las inversiones compiten con inversiones en otros sectores tecnológicos y no tecnológicos) y por tanto los beneficios de las inversiones en el sector energía pueden ser contrarrestados por

²⁰ Es decir calculada dentro del modelo.

²¹ La incorporación del cambio tecnológico implica complicaciones extraordinarias para el cálculo de los equilibrios económicos debido a que modifica las funciones de producción del modelo y lleva a soluciones no únicas del sistema.

²² Edenhofer Ottmar (2006)

²³ De forma notable las contribuciones de Golder y Schneider y de Nordhaus

pérdidas en otros sectores. Es decir, los beneficios serán tales sólo en los casos en los que las inversiones en el sector energía dichos sean más rentables que las inversiones en otros sectores de innovación.

Por su parte los modelos de curvas de aprendizaje mostraban que las reducciones en los costos de nuevas tecnologías impulsados por políticas que ampliaran la escala de su uso, podrían revolucionar el sistema energético de tal forma que los costos de un futuro de bajo carbón podrían ser equiparables a los del futuro con altas emisiones de carbón en los que no se hubieran implementado políticas específicas para un desarrollo tecnológico limpio.

El debate sobre la incorporación del cambio tecnológico sigue siendo un tema de investigación crucial para las políticas de cambio climático. Por lo que hace a los modelos económicos es evidente que los supuestos sobre esta variable tan importante requieren un mayor acoplamiento entre los denominados modelos “bottom-up” y los modelos “top-down” que analizan de forma sinérgica los costos de mitigación y su difusión hacia el resto de la economía.

Las gráficas siguientes muestran los resultados de los distintos foros de modelación de forma comparativa. Como se aprecia, existe una gran dispersión en los resultados. Dicha divergencia se explica en gran medida debido a los siguientes factores: diversos supuestos para el desarrollo de las líneas base, consideración de análisis multi-gases vs análisis de CO₂ únicamente, y supuestos diversos para el análisis del cambio tecnológico.

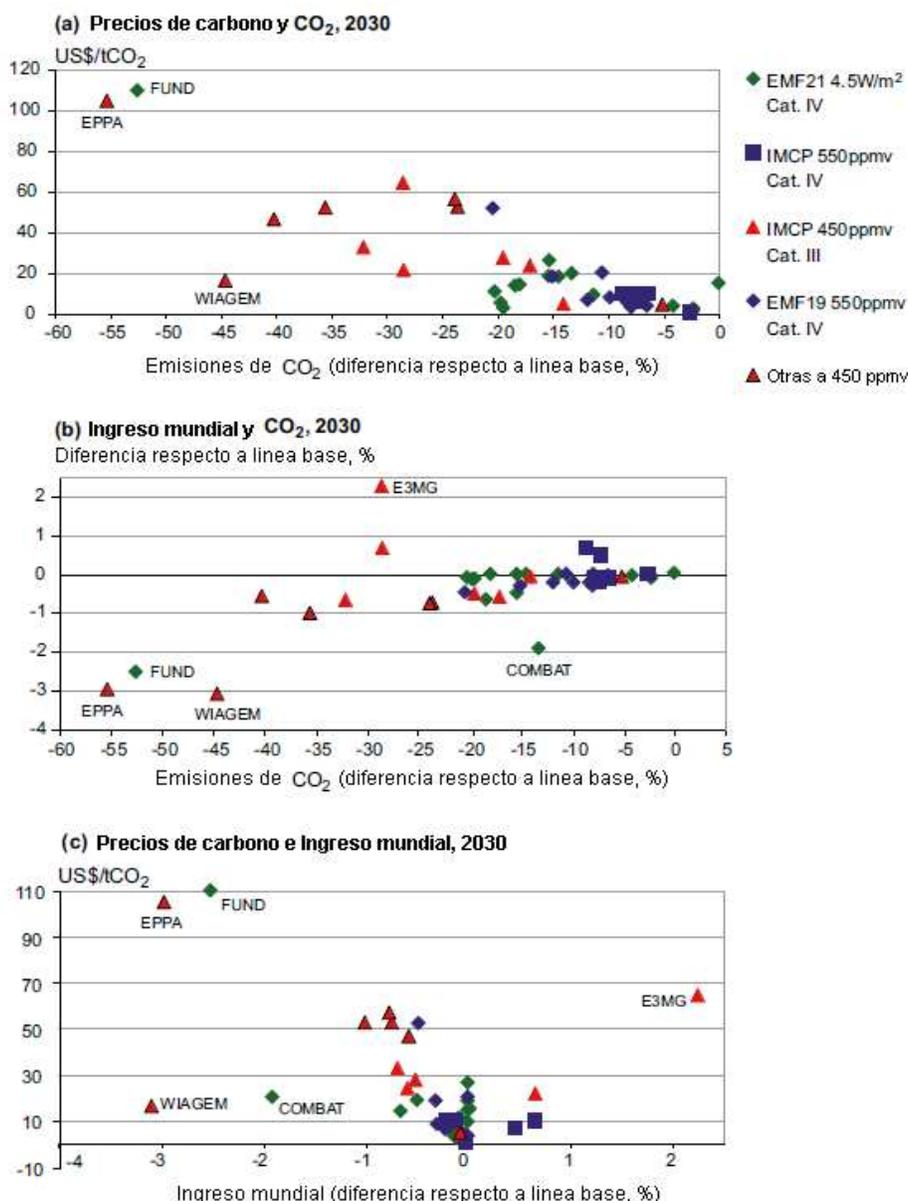


Figura 15. Resultados de distintos modelos sobre las rutas de estabilización hacia el 2030

Fuente: Fisher et al (2007). IPCC IV Assessment Report. WGII Mitigation, p. 648

4.3.3. GRUPO DE TRABAJO RESPONSABLE DE LA ELABORACIÓN DE LOS NUEVOS ESCENARIOS HACIA EL QUINTO INFORME DEL IPCC

Un cambio importante en la elaboración de los nuevos escenarios que serán utilizados en el Quinto Informe del IPCC, es que el Panel ha decidido que sea la comunidad de investigadores misma quien coordine la elaboración de los escenarios y no el mismo

IPCC como sucedió en el pasado. En este sentido, el papel del IPCC será el de catalizar los esfuerzos colaborativos de tal suerte que los nuevos escenarios estén listos para ser utilizados en el Quinto Informe del IPCC.

Los grupos de investigación que participan en la elaboración de los escenarios pueden clasificarse en tres grandes tipos: modelos climáticos (CM por sus siglas en inglés), modelos de valoración integrada (IAM por sus siglas en inglés), y modelos de impactos, adaptación y vulnerabilidad (IAV por sus siglas en inglés). En este apartado se describen de forma general los avances hasta el momento en los modelos de valoración integrada, mismos que han sido coordinados por el Consorcio de Modelación de Valoración Integrada (Integrated Assessment Modeling Consortium, IAMC). Dicho consorcio agrupa a los principales grupos modeladores a nivel mundial, por lo que hace a la comunidad IAM.

Es evidente que a fin de que el Quinto Informe de IPCC brinde información relevante para establecer objetivos de mitigación, se requiere de mayores esfuerzos para construir nuevos escenarios armonizados. Atendiendo a esta necesidad el IPCC ha facilitado a los distintos grupos de modelación esquemas de trabajo que permitan considerar las distintas interrelaciones entre los modelos a fin de que se pueda incluir en los resultados los modelos climáticos, los modelos económicos y los nuevos modelos para el análisis de impactos de vulnerabilidad y políticas de adaptación.

El IPCC ha planteado que a fin de que los resultados estén listos de forma oportuna, en lugar de seguir un esquema secuencial como en el pasado, los grupos de modelación trabajarán en forma paralela conforme al esquema de trabajo se presenta de forma esquemática en la Figura 16. Un elemento central en la elaboración de los nuevos escenarios es partir de trayectorias representativas de las concentraciones (Representative concentration pathways, RCP) y de los niveles de forzamiento radiativo resultantes, a fin de que de forma paralela se puedan correr los modelos climáticos y los modelos económicos. Los ejercicios de modelación que se realicen para México pueden considerar estos trabajos a fin de que sean comparables con los resultados globales que se presenten en el Quinto Informe del IPCC. Ello permitirá contar con resultados consistentes con los últimos avances a nivel internacional.

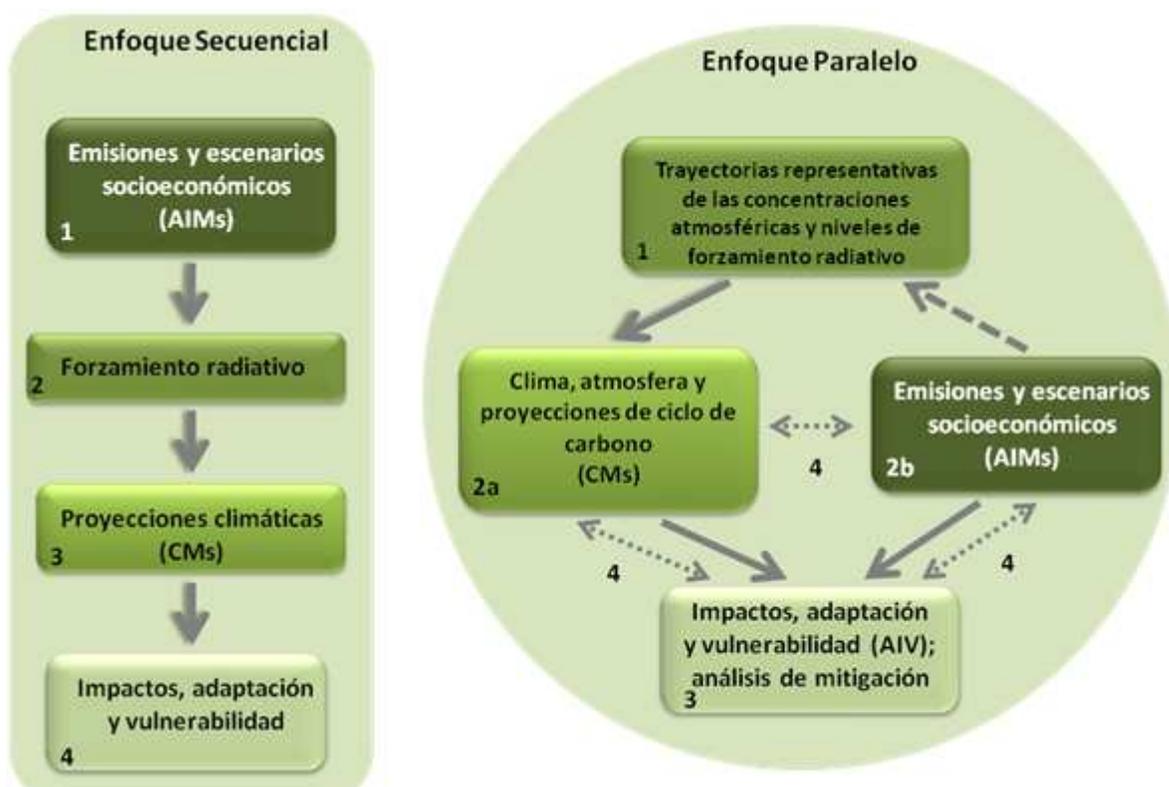


Figura 16. Esquema de Trabajo Paralelo de los Grupos de Modelación Hacia la Construcción de Nuevos Escenarios

Fuente: IPCC, Expert Meeting Report: Towards New Scenarios, 2008.

El Grupo de Expertos en modelación ha tenido dos reuniones de trabajo formales en Holanda y Austria, y ha generado a la fecha un primer reporte de avance. Por lo que hace a los modelos de valoración integrada se espera que a finales del 2010 se cuente con los siguientes resultados: nuevos escenarios sobre principales determinantes del crecimiento, nuevos escenarios alternos del desarrollo de tecnologías, escenarios alternos de estabilización que incluyan los enfoques tradicionales de concentraciones máximas, así como escenarios de límites irreversibles, comúnmente denominados efectos “overshoot”, y representaciones regionales heterogéneas sobre políticas de mitigación²⁴.

Uno de los objetivos explícitos del Grupo de Trabajo para la elaboración de nuevos escenarios para la Convención Marco de Cambio Climático, es el de involucrar de forma más intensa a los modeladores de los países en desarrollo, a fin de que los escenarios y análisis de mitigación puedan reproducir de forma más fidedigna y desagregada los impactos en el mundo en desarrollo. La arquitectura propuesta en este estudio, permitirá a México participar en estos trabajos y contar con un modelo de valoración integrada de la

²⁴ IPCC Expert Meeting Report: Towards New Scenarios - Technical Summary

calidad necesaria para participar en los trabajos comparativos y de simulación que se realizan a nivel internacional. Ello permitirá al país contar con información clave para los procesos de negociación rumbo al esquema pos-Kioto.

A continuación se hace una caracterización sobre los modelos aplicados a nivel nacional para políticas de mitigación, a fin de en el último capítulo, describir la arquitectura propuesta para modelar la política de cambio climático en México.

5. MODELOS PARA EVALUAR POLÍTICAS NACIONALES Y REGIONALES DE MITIGACIÓN EN ESTUDIOS SELECCIONADOS

Los modelos globales permiten realizar estimaciones sobre los escenarios de emisiones y escenarios de estabilización a nivel mundial, así como sobre los costos de mitigación, también a escala global. Como se señaló en la descripción de modelos globales dichos ejercicios deben recurrir a agregaciones regionales de muchos países a fin de poder modelar la economía mundial. Evidentemente, para el análisis de políticas de mitigación, es necesario tener estudios específicos por país a fin de diseñar medidas adecuadas, que puedan ser acordes al nivel de desarrollo de los países y también que permitan evaluar los impactos domésticos de distintas medidas de mitigación incorporando características propias de las economías.

Los modelos globales realizan supuestos que permiten estimar un costo asociado a la tonelada de CO₂ a nivel mundial. Ello implícitamente presupone que se lograría una armonización en todos los países sobre las políticas de cambio climático y que todas las regiones aplicarían, sin consideraciones por ejemplo de equidad, el mismo impuesto y/o participarían de forma irrestricta del comercio de emisiones. Dada la situación política de las negociaciones, es conveniente analizar escenarios nacionales que permitan evaluar qué sucede con los costos de mitigación si se relajan estos supuestos y se evalúan los impactos económicos, por ejemplo, de una participación desigual y regionalizada en las metas de mitigación.

Por la naturaleza del problema del cambio climático, sin embargo, no se deben de realizar modelaciones que incluyan únicamente una región o país lo que lleva a una disyuntiva sobre los modelos más adecuados a utilizar. Es por ello que lo más recomendable es utilizar un modelo de escala global, pero suficientemente detallado en la región a analizar, en este caso a nivel país, a fin de que los resultados sean representativos para su uso en las políticas públicas específicas.

Distintos países han realizado ya esfuerzos nacionales para determinar el impacto de políticas de mitigación a nivel nacional. Para ello han aplicado tanto modelos “top-down” como “bottom-up” y en algunos casos “modelos híbridos”, los cuales aun están en procesos de acoplamiento pero que ya permiten tener algunas interacciones importantes.

Los países desarrollados son los que mayores estudios han elaborado. Estados Unidos, Canadá, Holanda, Alemania, el Reino Unido, Francia, Australia y Japón han elaborado modelaciones detalladas de escenarios de mitigación. Recientemente, China y la India, han elaborado también evaluaciones con modelos de valoración integrada que si bien no han incorporado en el análisis metas específicas de reducción, sí permiten analizar el impacto de medidas globales y de repercusiones, por ejemplo, en el precio de los energéticos y en las emisiones resultantes a nivel global.

Como se mencionó, las modelaciones “top-down” realizan un análisis macroeconómico a fin de determinar el potencial de mitigación de emisiones. Los modelos “bottom-up” enfatizan el análisis tecnológico y regulatorio en sectores específicos por lo que brindan información detallada, por ejemplo, sobre decisiones energéticas específicas. A pesar de realizar un análisis sectorial detallado, estos modelos generalmente evalúan el equilibrio parcial de la economía, por lo que consideran las variables macroeconómicas como dadas y no incluyen los mecanismos de retroalimentación hacia el resto de la economía.

Los modelos por su naturaleza son más adecuados para analizar distintas métricas, por ejemplo, los modelos “top-down” permiten analizar pérdidas en el PIB mientras que los modelos de equilibrio parcial o “bottom-up” son generalmente más adecuados para analizar el valor presente neto de los costos de mitigación en un sector, comúnmente presentados en forma del costo por tonelada de CO₂. Es conveniente precisar que en este caso el costo por tonelada se refiere al costo de mitigación y no al costo social del CO₂, el cual incluye un análisis completo de externalidades.

La Tabla 6 muestra algunos de estos esfuerzos nacionales, los cuales fueron citados por el IPCC en su Cuarto Informe.

Tabla 6. Modelos utilizados para realizar escenarios nacionales de mitigación al 2050 y en periodos más allá del 2050

País	Autor	Modelo	Horizonte	Variables objetivo	Año base	Meta de reducción respecto al valor del año base
Estados Unidos	Hanson et al. (2004)	AMIGA ¹	2000-2050	-	2000	Cercano al 44% en 2050
Canadá	Natural Resource Canada (NRCan) (2000)	N.A.	2000-2050	Emisiones de GEI	2000	53% en 2050
India	Nair et al. (2003)	Integrated modelling framework ^{1,3}	1995-2100	Emisiones de CO ₂ acumulativas		550 ppmv, 650 pmv
	Shukla et al. (2003)	ERB2	1990-2095	Emisiones de CO ₂		550 ppmv
China Países Bajos	Chen (2005)	MARKAL-MACRO ^{2,3}	2000-2050	Emisiones de CO ₂	Referencia	5-45% en 2050
	Van Vuuren et al. (2003)	IMAGE/TIMER ^{2,4}	1995-2050	Emisiones de GEI	1995	-
	Jiang and Xiulian (2003)	IPAC-emission ^{2,3}	1990-2100	Emisiones de GEI	1990	-
	Tuinstra et al. (2002) (COOL)		1990-2050	Emisiones de GEI	1990	80% en 2050
Alemania	Deutscher Bundestag (2002)	WI ⁴ , IER	2000-2050	Emisiones de CO ₂	1990	80% en 2050
Reino Unido	Department of Trade and Industry (DTI) (2003)	MARKAL ³	2000-2050	Emisiones de CO ₂	2000	45%, 60%, 70% en 2050
Francia	Interministerial Task Force on Climate Change (MIES) (2004)	N.A.	2000-2050	Emisiones de CO ₂	2000	0.5 tC/límite máximo (70% en 2050)
Australia	Ahammad et al. (2006)	GTEM ¹	2000-2050	Emisiones de GEI	1990	50% en 2050

País	Autor	Modelo	Horizonte	Variables objetivo	Año base	Meta de reducción respecto al valor del año base
Japón	Japan LCS Project (2005)	AIM/Material ¹ MENOCO ⁴	2000-2050	Emisiones de CO ₂	1990	60-80% en 2050
	Ministry of Economy, Trade and Industry (2005)	GRAPE ³	2000-2100	CO ₂ /PIB	2000	1/3 en 2050, 1/10 en 2050
	Masui et al. (2006)	AIM/Material ¹	2000-2050	Emisiones de CO ₂	1990	74% en 2050
	Akimoto et al. (2004)	Modelo de optimización ³	2000-2050	Emisiones de CO ₂	2000	0.5%/año (21% en 2050)
	JAPAN Atomic Industrial Forum (JAIF) (2004)	MARKAL ³	2000-2050	Emisiones de CO ₂	2010(1990)	40% en 2050

Notas: 1) Modelo “top-down” de equilibrio general computable; 2) Modelo “top-down” de otro tipo; 3) Modelo “bottom-up” de optimización lineal; 4) Modelo “bottom-up” de simulación

Fuente: IPCC, IV Assessment Report, WGIII, Mitigation.

El cuadro muestra una selección de estudios para elaborar escenarios de mitigación nacionales, en los cuales se señalan los modelos “top-down” del tipo de equilibrio general computable, otros modelos “top-down”, modelos “bottom-up” con optimización y otros modelos “bottom-up” sin optimización que fueron utilizados.

Los modelos citados por el IPCC en este Cuadro, aplicados a nivel nacional o regional, del tipo top-down son: AMIGA (Estados Unidos), MACRO (China y Holanda), IPAC (China), GTEM (Australia) y AIM (Japón). Los modelos “bottom-up” utilizados en los estudios referidos en el Cuadro 2 son: MARKAL (China, Holanda, Reino Unido y Japón), TIMER (China y Holanda), IPAC (Integrated Policy Assessment Model for China), Modelo WI / EIR (Alemania), Optimization Model (Japón), MENOCO (Japón) y GRAPE (Japón). Algunos modelos que avanzan hacia un camino híbrido son el Integrated Modelling Framework en la India, el MARKAL- MACRO (China y Holanda) y el IPAC-emissions.

Del análisis de modelos aplicados en países en desarrollo, podemos derivar que para el caso de China e India, se seleccionaron modelos globales que ya tuvieran incorporado a un nivel de detalle alto la región asiática, y después se desglosaron con gran detalle las economías de China e India, respectivamente. En este caso se basaron en el modelo AIM descrito en la primera parte de este capítulo, y desagregaron los sectores energía en cada uno de estos países. Para el caso de India, por ejemplo, se realizó una modelación detallada del sector energía aplicando un modelo “bottom-up” denominado MARKAL y para el caso de China el componente “bottom-up” del AIM-emissions descrito en el capítulo 5.

Por la cercanía con los Estados Unidos, es relevante para México conocer los modelos que se utilizan actualmente en dicho país para evaluar las propuestas legislativas en materia de cambio climático. Actualmente, en Estados Unidos desarrolla actualmente un estudio macro con la colaboración de seis de los principales grupos de modelación,

coordinado por el EMF,²⁵ para evaluar los impactos económicos de las propuestas que se encuentran en discusión por el poder legislativo norteamericano. Los modelos que participan en este estudio son ADAGE (RTI), IGEM (DJA), EPPA (MIT), MRN-NEEM (CRA), MiniCAM (PNNL/JGCRI) y el MERGE (EPRI). El objetivo de dicho estudio es proveer información tanto para las negociaciones internas como para las negociaciones internacionales, por lo que hace a la posición de Estados Unidos.

En este capítulo, se presentan algunas características importantes de los modelos utilizados en estudios de otros países, tanto de modelos “top-down” como “bottom-up” que son consideradas en el diseño de la arquitectura de modelación. Esto es útil para entender cuáles son las ventajas y desventajas de los modelos utilizados ya que el modelo a aplicar en México depende más de las características genéricas de los modelos que de aplicaciones específicas en otros países.

5.1. Clasificación de Modelos Económicos adaptados para evaluar políticas de mitigación

Una clasificación útil para entender la estructura de los modelos es la propuesta por el IMCP²⁶, que se presenta en la Tabla siguiente. Los modelos pueden clasificarse de acuerdo al grado de detalle en la modelación de tecnologías como en el método de cálculo utilizado.

Tabla 7. Clasificación de modelos por sus características

Método de cálculo	Detalle de modelación en la parte tecnológica	
	Top Down	Bottom up
Maximización del bienestar	Modelos de crecimiento óptimo	
Minimización de costos		Modelos de sistemas energéticos
Problemas de valores iniciales (o de frontera)	Modelos de simulación	
Equilibrio estático + dinámica recursiva	Modelos de equilibrio general computable	

Fuente: Adaptado de Edenhofer (2006)

A continuación se describen las principales características de los modelos “top-down”, “bottom-up” e híbridos, a fin de facilitar la discusión del modelo seleccionado para el caso de México. Evidentemente, estos enfoques se aplican tanto para los modelos globales, como en las aplicaciones a escenarios nacionales y regionales. Se precisa que en los

²⁵ Véase EMF22: Climate Policy Scenarios: U.S. and International Policy Architectures

²⁶ Edenhofer Ottmar, Kai Lessmann, Claudia Kemfert, Michael Grubb and Jonathan Köhler. Induced Technological Change: Exploring its Implications for the Economics of Atmospheric Stabilization: Synthesis Report from the Innovation Modeling Comparison Project. Special Issue of the Energy Journal. International Association for Energy Economics, IAEE, 2006

modelos “bottom-up” se describen únicamente los temas relacionados al sector energía, aunque existen otros sectores en los que existen modelos “bottom-up” relevantes para el tema de cambio climático, tales como el sector forestal, residencial y transporte.

5.2. Modelos “top-down”

Los modelos “top-down” de equilibrio se pueden clasificar a grosso modo en dos tipos²⁷: aquellos que modelan la economía a través del modelo agregado de crecimiento económico de Ramsey, incorporando el sector ambiental²⁸, y los modelos duales de equilibrio general computable que resuelven para un conjunto de productos y precios, niveles de actividad industrial y de ingreso de los hogares, que permite el equilibrio de los mercados, dadas funciones agregadas de producción y utilidad del consumidor²⁹. Otros modelos son aquellos que consideran desequilibrios macroeconómicos y que modelan la economía a través de series de tiempo y aplicaciones econométricas³⁰.

Los modelos de crecimiento económico óptimo tienen el objetivo de explicar la dinámica de la economía en horizontes de largo plazo. La propiedad fundamental de estos modelos, que se derivan de la teoría neoclásica del crecimiento, es la maximización de la función de utilidad social. Los primeros modelos de crecimiento óptimo se basaron en las teorías de Robert Solow del MIT y Uzawa de Stanford para entender la macroeconomía de forma dinámica a partir de los primeros desarrollos teóricos de Ramsey y extendiendo el modelo Harrod–Domar para analizar los cambios en la productividad de la economía. El primer modelo que aplicó esta teoría al análisis de los problemas ambientales y concretamente al cambio climático fue el modelo DICE, desarrollado por William Nordhaus, de Yale University. En la actualidad, la teoría del crecimiento endógeno ha incorporado el análisis del cambio tecnológico en estos modelos.

Los modelos de crecimiento económico óptimo calculan soluciones “óptimas” del tipo “first-best” o del tipo “second best”. Los denominados “first-best”³¹ asumen mercados perfectos y políticas óptimas. Los denominados “second-best”³² incorporan mercados imperfectos y por tanto políticas sub-óptimas. Esta última permite el análisis de políticas que consideran opciones de mitigación con costos negativos (beneficios), entre otras posibilidades de análisis de mercados que no se equilibran perfectamente.

Los modelos de simulación o econométricos³³ parten de un estado dado de la economía para determinar el estado en el futuro. En términos matemáticos, resuelven el sistema

²⁷ Sue Wing, Ian et al. The synthesis of bottom-up and top-down approaches to climate policy modeling: electric power technologies and the cost of limiting US CO₂ emissions. *Energy Policy* 34 (2006) 3847–3869

²⁸ Tales como el modelo DICE y RICE desarrollados por William Nordhaus.

²⁹ Tales como el modelo EPPA del MIT

³⁰ Por ejemplo el Modelo E3MG

³¹ Por ejemplo, el modelo MIND

³² Por ejemplo, el modelo FEER-RICE, El RICE es la versión regionalizada del modelo DICE

³³ Tales como el modelo E3MG basado en un enfoque post-Keynesiano de desequilibrio macroeconómico con dos conjuntos de ecuaciones econométricas que describen la demanda de energía y de exportación utilizando la cointegración Engle-Granger.

para valores iniciales o, como se conoce, se establece un problema de valores de frontera a través de un sistema de ecuaciones diferenciales, basándose en series de tiempo. El problema de estos modelos es que parten de datos pasados que no necesariamente reflejan el comportamiento futuro de la economía en el largo plazo.

Los modelos de equilibrio general computable, CGE, determinan el equilibrio de la demanda y la oferta en sectores interdependientes. Los modelos CGE consisten de ecuaciones que describen las interrelaciones entre ofertas y demandas y una base de datos, generalmente muy detallada, consistente con las ecuaciones especificadas para el modelo. Las versiones actuales de los CGE permiten el análisis de desequilibrios de mercado, a pesar de que las ecuaciones son neoclásicas en esencia, lo que permite analizar por ejemplo: mercados en desequilibrio (particularmente el mercado laboral), estructuras de mercado no competitivas (por ejemplo, la presencia de monopolios), demandas que no responden a precios dados (por ejemplo para simular demandas del gobierno específicas), distintas estructuras fiscales y efectos de las externalidades, tales como las ambientales (tanto por contaminantes primarios y sus efectos en la salud como por los impactos del cambio climático).

Los modelos de CGE se derivaron de las tablas insumo-productos conocidas como tablas de Leontief, sin embargo asignan un papel mucho más importante a los precios, permitiendo por ejemplo ajustes a las demandas de trabajo asociadas a decrementos en los precios de insumos y de salarios. Algunos modelos de CGE se denominan de equilibrio estático y de dinámica recursiva ya que calculan el equilibrio del sistema en puntos dados describiendo la trayectoria de crecimiento. Los CGE permiten analizar las dinámicas intersectoriales y las afectaciones a los precios relativos, por lo que son muy útiles para analizar en forma detallada las consecuencias macroeconómicas y sectoriales de políticas públicas específicas en un sector.

5.3. Modelos “bottom-up” para el sector energía

Los modelos “bottom-up” en el sector energía se conocen también como modelos de ingeniería económica, dado que se fundan en los principios de la ingeniería, por ejemplo en el flujo físico de materiales, la capacidad tecnológica, entre otros, y se acoplan con la información económica sobre costos y estrategias sobre decisión de inversiones. Dichos modelos proporcionan información para la elaboración de políticas energéticas, principal objetivo de su desarrollo, y han sido aplicados de forma extensa para evaluar los impactos ambientales del sector en el contexto de políticas para el cambio climático.

Dichos modelos resuelven el sistema al nivel de capacidad para transformar energía y de tecnologías específicas con el objetivo de minimizar³⁴ los costos del sistema energético y satisfacer la demanda de servicios energéticos. Dichas demandas se determinan ya sea a través de curvas de demanda estimadas ex profeso o de demandas derivadas de un modelo macroeconómico. Usualmente, los modelos reportan el incremento en costos totales del sistema energético, el valor presente neto de los costos de mitigación y como indicador el costo en dólares por tonelada de carbón (o de CO₂).

³⁴ Algunos modelos no se resuelven a través de la optimización lineal, por lo que son modelos de “simulación” únicamente, no de optimización.

Los modelos “bottom-up” tienen distintas especificaciones, por ejemplo, en el grado de desglose de los sectores económicos, en la representación de las tecnologías, sobre las reglas de decisión, el objetivo del modelo (simulación u optimización) y el grado de integración con modelos macroeconómicos. Son en términos generales altamente demandantes de información tanto sobre las características del sistema energético que se analizan como de demandas en términos de los servicios energéticos³⁵ que se requieren en el escenario base y proyectadas.

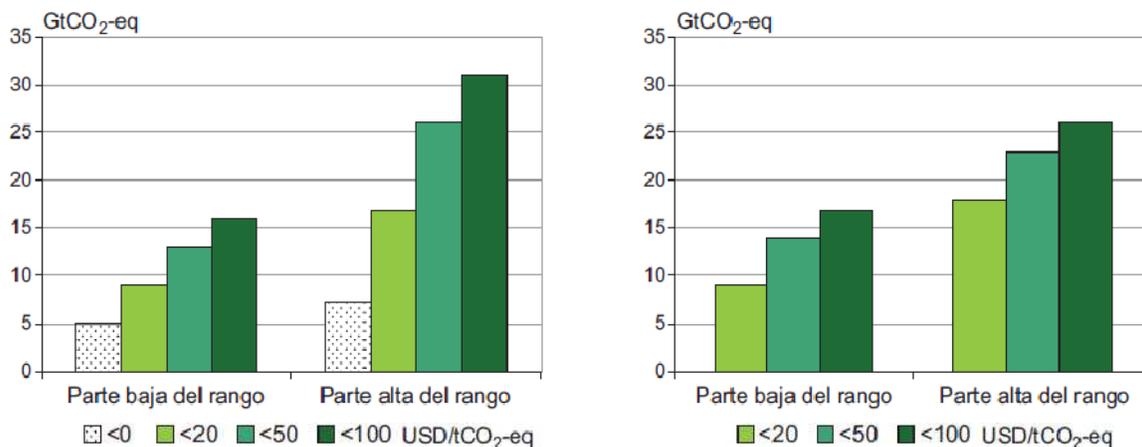


Figura 17. Comparación de modelos Top down y bottom up por potencial de mitigación y rangos de costos

Fuente: Baker (2001b).

5.4. Modelos híbridos

La vinculación entre los modelos “bottom-up” y “top-down” es actualmente un tema fundamental en los centros de investigación para el cambio climático. Por una parte, los modelos “top-down” han incorporado gradualmente mayor detalle en las opciones tecnológicas que se incluyen en la modelación y por su parte, los modelos “bottom-up” han incluido algunas variables macroeconómicas y mecanismos de retroalimentación hacia otros mercados, así como algunas otras variables fundamentales tales como la estructura de mercado sectorial, incluyendo las barreras existentes. Los modelos “bottom-up” son particularmente útiles para analizar las opciones de mitigación en sectores específicos. Los modelos “top-down” permiten un análisis multisectorial de toda la economía.

Es decir, gradualmente los modeladores que se enfocan a analizar los impactos macroeconómicos han tratado de desglosar los sectores críticos en la modelación a través de incorporar en sus modelos las salidas de los modelos “bottom-up”. Por la relevancia del sector energía en materia de mitigación del cambio climático, los trabajos más importantes se han llevado a cabo para vincular modelos específicos de planeación

³⁵ Por ejemplo, se requiere estimar la demanda de calefacción en términos de m² a calentar y no en términos de gas u combustible, de transporte en términos de km-hombre recorridos y no en términos de gasolina, etc.

energética con los modelos macroeconómicos. A su vez, los modelos de planeación energética y ambiental, han empezado a incorporar de forma endógena al modelo variables críticas para los sectores, tales como el impacto del cambio tecnológico y los impactos de cambios en los precios de los energéticos .

Algunos temas de frontera que no se han incorporado aun en los modelos son el impacto de los distintos “estilos de vida” y del análisis de incorporar todas las externalidades ambientales en la modelación, tales como las provenientes de impactos por contaminación atmosférica local y regional. Otro tema de investigación relevante es el incorporar a los escenarios el impacto de las futuras regulaciones de emisiones de gases de efecto invernadero sobre la trayectoria de las emisiones, mismo que hasta este momento no se ha incorporado en el análisis pero que sin embargo, es plausible esperar como resultado de las intensas negociaciones internacionales dentro de la Convención Marco de Cambio Climático.

Características deseadas en el modelo seleccionado

De la descripción de las características de los modelos resulta de especial interés para México contar con un modelo de equilibrio general computable con el fin de realizar un análisis multisectorial de las políticas de mitigación del cambio climático, considerando los efectos en precios en distintos mercados. Por su parte, los modelos “bottom-up” del sector energía proporcionan información valiosa para la promoción de energías renovables y en general para tomar decisiones sobre la matriz energética del país, por lo que es importante incluir modelos detallados que permitan alimentar a los modelos “top-down”. Se pueda avanzar hacia enfoques híbridos que proporcionen información en ambos sentidos, para el sector y sobre los efectos macroeconómicos de los objetivos de mitigación lo que será considerado en las aplicaciones que se hagan para México.

6. MODELO INTEGRADO DEL SISTEMA GLOBAL DEL MIT (IGSM)

Este modelo es una herramienta que permite estudiar las causas del cambio climático y las consecuencias potenciales tanto sociales como ambientales. Cuenta con componentes que simulan el clima, el cambio tecnológico, y la economía y las políticas públicas, permitiendo esto pronosticar los aspectos más relevantes relacionados con el cambio climático. El IGSM tiene tres componentes: el económico, el climático y el de ecosistemas terrestres:

1. El componente económico, de emisiones y del costo de políticas, sirve para analizar la actividad humana y su interacción con el proceso climático; además permite evaluar distintas propuestas de políticas públicas.
2. El componente climático y del sistema terrestre acopla a la atmósfera (su dinámica y química), el océano, la tierra y las interacciones y procesos de retroalimentación con los ecosistemas naturales.
3. El componente de ecosistemas terrestres y los modelos de intercambios biogeoquímicos, se ubican dentro de la estructura del sistema global terrestre, para analizar el comportamiento de la biósfera.

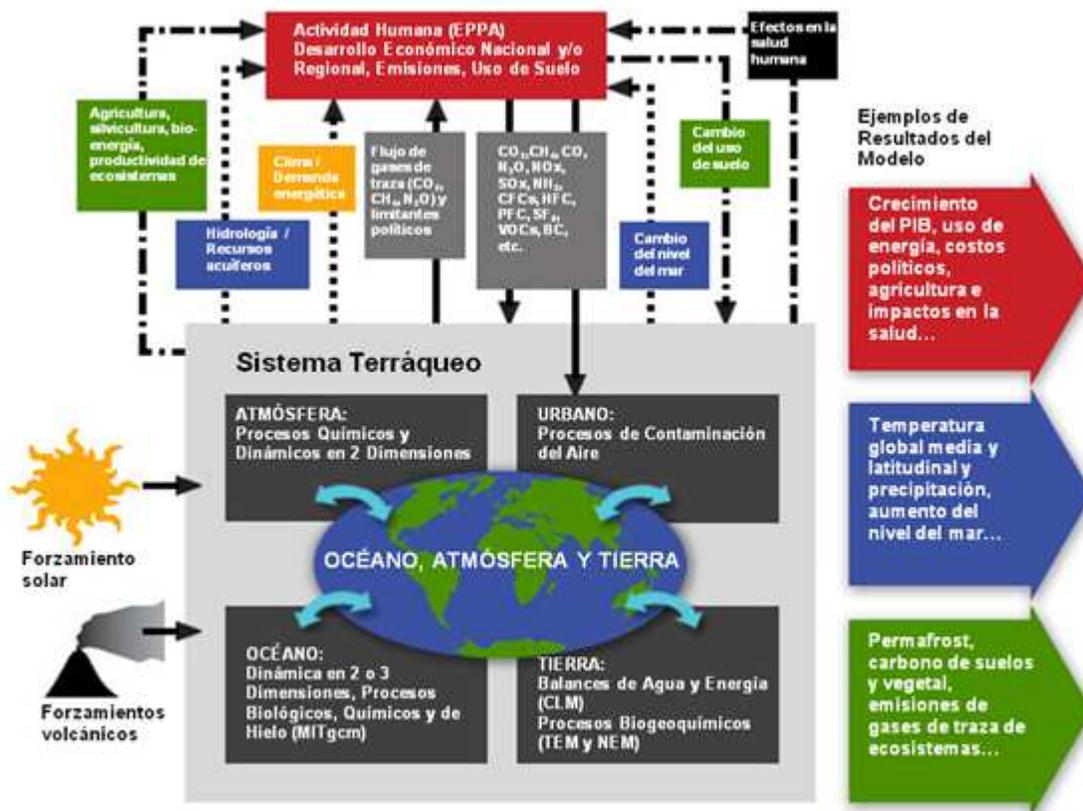


Figura 18. Modelo de MIT

Fuente: MIT 2009

Estos tres componentes a su vez informan a otro componente que analiza los procesos de retroalimentación y los impactos que el cambio climático tiene sobre los componentes iniciales. Los impactos del cambio climático se perciben sobre todo en los ecosistemas terrestres y en el nivel del mar; en la retroalimentación del cambio climático en el ciclo del carbón y en las emisiones naturales de CH₄ y N₂O; en los efectos sobre la agricultura; y en la interacción de la química del clima con la contaminación urbana (Sokolov et al, 2005; Prinn et al 1999).

En la Figura 18 se describen los componentes del IGSM2. A través del tiempo se ha ido refinando el modelo inicial y ahora se está trabajando con la segunda versión, el IGSM2 (o IGSM2, por sus siglas en inglés). La Figura 5 esquematiza la estructura del modelo así como los procesos que se reflejan en el modelo. Las líneas continuas entre los componentes del modelo indican intercambios que se dan en las simulaciones ordinarias del modelo; las líneas pespunteadas indican conexiones que existen en el modelo y que se han usado en estudios específicos; por último las líneas punteadas indican áreas donde se está trabajando sobre los procesos de retroalimentación. En lo que sigue de esta sección se describirán con detalle cada uno de los componentes del IGSM2.

6.1. El componente económico

El Modelo de Predicciones de Emisiones y Análisis de Políticas (Emissions Prediction and Policy Analysis Model o EPPA, por sus siglas en inglés) del MIT hace proyecciones de desarrollo económico para las distintas regiones del mundo y a partir de ellas calcula las emisiones. Además analiza distintas opciones de políticas de mitigación. Se utiliza para analizar los procesos generados por los GEI y para evaluar las consecuencias de distintas políticas públicas propuestas, proporcionando estimaciones de la magnitud y distribución entre las naciones de los costos de estas políticas y muestra la manera en que estos cambios se reflejan en el comercio internacional.

El EPPA es un modelo de equilibrio general computable de la economía mundial. Es además multisectorial y multiregional. Utiliza la base de datos de GTAP datos (de la Universidad de Purdue), y se agregan datos de emisiones de gases de efecto invernadero, aerosoles y otras especies pertinentes. Además se incorporan los impuestos y detalles de los sectores económicos seleccionados. Este modelo también se ha usado para analizar incertidumbre relacionada con factores clave, como el crecimiento poblacional, el comportamiento de la actividad económica y el ritmo y la dirección de progreso tecnológico. La Figura 19 esquematiza este modelo.

El modelo está formulado en dos versiones que varían en cuanto a la representación de las expectativas de los agentes económicos. El modelo de expectativas racionales (donde existe miopía en la toma de decisiones) es desde el punto de vista computacional el más eficiente; esto permite un tratamiento explícito del crecimiento y reposición del acervo del capital y un mayor nivel de detalle regional y de la tecnología (Paltsev et al, 2005). El modelo de expectativas adaptativas, por su parte, permite analizar aspectos donde la anticipación es un aspecto importante en la toma de decisiones de los distintos agentes (Gurgel et al, 2007).

El modelo proyecta variables económicas (PIB, uso de energía, producción sectorial, consumo, etc.) y emisiones de gases de efecto invernadero (CO₂, CH₄, N₂O, HFC, PFC y SF₆) y otros contaminantes del aire (CO, VOC, NOx, SO₂, NH₃, hollín y carbono orgánico) a partir de la quema de combustibles fósiles, procesos industriales, manejo de residuos y actividades agrícolas. También se han formulado distintas versiones del modelo para estudios específicos donde hay un tratamiento consistente de la retroalimentación entre el

cambio climático y la economía, tales como los efectos sobre la agricultura, silvicultura, bio-combustibles y los ecosistemas, y las interacciones con la contaminación del aire urbano y sus efectos sobre la salud. Por último, permite analizar distintas opciones de mitigación.



Figura 19. El componente económico

Fuente: MIT 2009

6.2. El componente del clima y el funcionamiento del sistema terrestre

En esta sección se describen dos modelos que se usan conjuntamente para representar al clima y el funcionamiento terrestre. Primero se describen los modelos usados para estudiar y simular el funcionamiento del sistema terrestre y posteriormente el del clima.

El sistema terrestre

Existen dos configuraciones del modelo del sistema terrestre dentro del IGSM. Ambas contienen un componente interactivo de química de la atmósfera y un componente de la química del aire urbano. Además, la primera configuración, denominada IGSM2.2, incluye un modelo donde se promedian por zonas aspectos de la dinámica y química atmosférica, un modelo termodinámico de hielos y océanos, un modelo de tierra con un modelo de biogeoquímica del ecosistema y un modelo de las distintas capas del océano para representar los procesos de absorción de calor y carbono. Esta configuración es la más eficiente permite explorar la incertidumbre del clima mediante miles de simulaciones. La segunda configuración, por su parte es la IGSM2.3, que se diferencia de la anterior porque contiene un modelo tridimensional de la circulación oceánica y muestra procesos de biología marina y químicos que controlan los ciclos biogeoquímicos de carbón, de los nutrientes y de la alcalinidad. A pesar de la mayor complejidad, esta configuración del modelo sigue siendo relativamente eficiente y se pueden correr cientos de simulaciones con el equipo adecuado.

Así, sea cual sea la versión del modelo usado, este componente permite, por un lado, hacer un gran número de corridas de muy largo plazo (varios siglos), variando parámetros climáticos de acuerdo a la incertidumbre detectada; además se pueden incluir diferentes niveles de detalle en los componentes del modelo, según las necesidades de estudios específicos. Por último, este modelo del sistema terrestre de complejidad intermedia permite entender la retroalimentación entre los componentes de modelo así como su relación con factores humanos y con objetivos de mitigación. Este componente de clima relativamente simplificado permite probar de manera exhaustiva distintas opciones de una manera que no podría hacerse en un modelo tridimensional de alta resolución. Los componentes del modelo del sistema terrestre se explican con detalle en Sokolov et al (2005).

El clima

El componente del sistema climático está conformado por submodelos acoplados, siendo estos referentes a la química atmosférica, dinámica atmosférica, dinámica oceanográfica, bioquímica oceanográfica y ecosistemas terrestres. Las partes del modelo se describen en la Figura 20.

Modelo climático y modelo químico del MIT

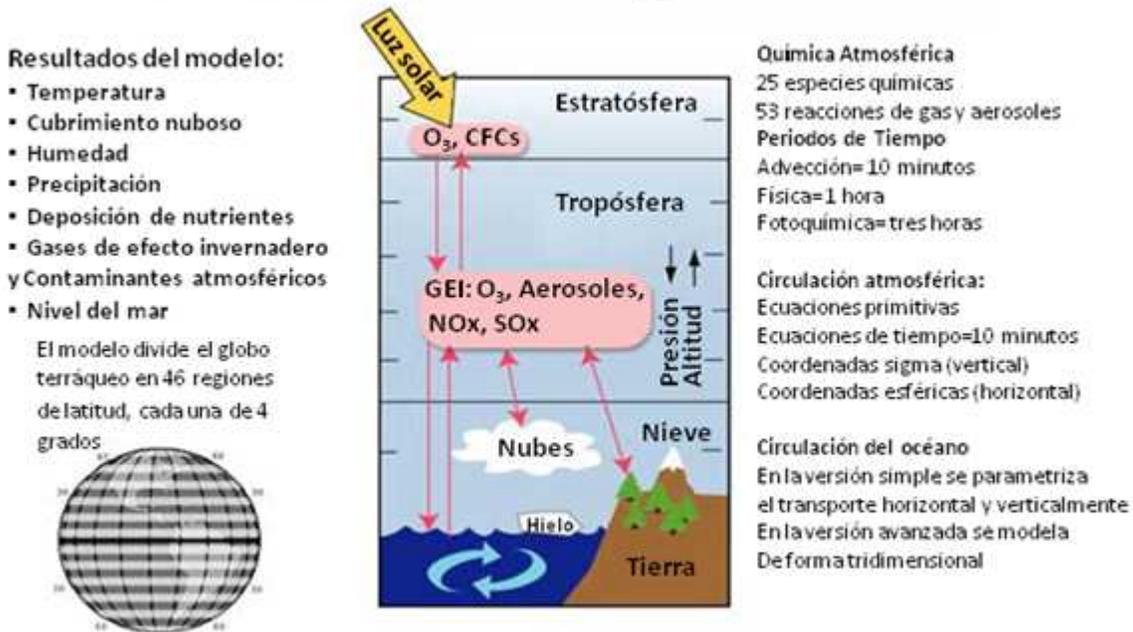


Figura 20. Modelo climático y químico del MIT

Fuente: MIT 2009

6.3. El componente del ecosistema y la cobertura terrestre

Un aspecto importante para la elaboración de políticas públicas es determinar cuál es el efecto del cambio climático sobre los distintos ecosistemas de la tierra. Estos cambios, además, afectan la dinámica del clima a través de los procesos de retroalimentación del ciclo de carbón y las emisiones naturales de otros gases.

El componente de los ecosistemas terrestres del IGSM incluye varios modelos desarrollados por otros centros de investigación, como el Centro Nacional de Investigación Atmosférica y el Laboratorio de Biología Marina, entre otros. Estos modelos están vinculados de manera dinámica, como se muestra en la Figura 8. En este componente, los distintos procesos, como los procesos hidrológicos y los flujos de calor superficial, la dinámica de carbono de los ecosistemas terrestres y el intercambio de nitrógeno y metano y otras emisiones naturales se representan acoplando modelos. En el componente acoplado resultante se refleja la distribución geográfica de la cubierta terrestre y la diversidad vegetal. El componente del sistema global de la tierra se documenta con mayor detalle en Schlosser et al (2007).



Figura 21. Componente del ecosistema y cobertura terrestre

Fuente: MIT 2009

En resumen, el modelo del MIT, es muy completo en cuanto que tiene representados a los principales componentes del sistema climático. Sin embargo, a diferencia de otros modelos, también tiene un módulo antropogénico capaz de modelar el comportamiento humano y su interacción con el clima.

6.4. Selección del modelo

A partir del análisis anterior, queda claro que existe un gran número de modelos que sirven para estudiar el sistema climático con una mayor o menor cantidad de componentes, detalle y procesos de retroalimentación entre ellos. Como se indicó en la sección sobre los aspectos generales de los modelos, no hay un modelo óptimo, sino que el mejor modelo a utilizar dependerá de las preguntas que se quieran responder.

En el caso de México en general y de la Secretaría de Energía en particular, es importante contar con un modelo donde se pueda ver claramente la forma en que las diferentes decisiones económicas o de los distintos ámbitos de la política pública interactúan con el funcionamiento del clima, para entender el impacto físico que se puede causar al planeta y concretamente a México.

Con este objetivo se seleccionó el modelo desarrollado por el MIT debido a que está diseñado de manera específica para simular el cambio global e incluye un componente socioeconómico. Esto hace que este modelo sea un modelo completamente acoplado, donde existe una antropósfera interactiva, y donde la actividad humana no sólo se introduce en el modelo a través de parámetros exógenos, sino que se modela. Este modelo también ha sido usado en el AR4 por el IPCC.

Se identificaron los siguientes elementos como relevantes para mejorar la representación de México en el modelo del MIT y simular posibles políticas públicas:

- I. Este modelo es reconocido por IPCC como un modelo de complejidad intermedia que además tiene un módulo antropogénico muy importante, denominado “antropósfera”, que representa la actividad humana.
- II. El componente de la antropósfera permite modelar el comportamiento económico y de políticas públicas y hacer simulaciones de mediano y largo plazo, tanto de carácter nacional como internacional, y determinar su impacto tanto para México como para sus principales socios comerciales y para el resto del mundo.
- III. Se puede ver la interacción de cambios en la antropósfera con cambios globales en la atmósfera, pudiendo medir los impactos físicos de las distintas políticas si los hubiera.
- IV. El componente económico del modelo integrado, el EPPA, puede correrse de manera independiente del modelo integrado, IGSM. Esto reduce significativamente los costos computacionales y pone a nuestra disposición una herramienta poderosa de fácil utilización, y permite hacer un amplio rango de corridas con implicaciones de políticas públicas.
- V. También crucial es que ya está funcionando el modelo del MIT con México como uno de los países considerados en detalle dentro del modelo, por lo que mejorar su representación es marginal con respecto a lo que se tendría que hacer dentro de otros modelos.
- VI. De la mayor relevancia es que los modeladores del MIT involucrados en el diseño, alimentación, operación y mantenimiento del modelo están abiertos a la participación activa de México dentro de su grupo de trabajo y dispuestos a trabajar con modeladores mexicanos. Están asimismo interesados en mejorar la representación de América Latina.

- VII.** Los modeladores del MIT están interesados en mejorar la representación de México para contar con un mejor modelo capaz de responder a preguntas relevantes para la región de América del Norte.

En México se requiere de herramientas modernas que permitan realizar análisis de sistemas complejos en un contexto global. El papel preponderante del sector energía en el tema del cambio climático, y las interacciones macroeconómicas implícitas de la política energética, requieren de modelos integrados que permitan la selección de estrategias y de tecnologías en un contexto amplio, evaluando las implicaciones económicas y ambientales. El modelo seleccionado permitirá realizar dichos análisis.

7. APLICACIONES POSIBLES DEL MODELO IGSM-EPPA EN POLÍTICAS PÚBLICAS DE MEXICO SOBRE CAMBIO CLIMÁTICO

El modelo seleccionado nos permite auxiliar en el análisis de políticas estratégicas para enfrentar el cambio climático en México. De forma relevante, el modelo permitirá también analizar las implicaciones internacionales de políticas globales, regionales y sectoriales derivadas de los acuerdos que se alcancen en Copenhague y en la futura COP16 en México, que posiblemente definirá el régimen de cambio climático global Post-Kioto. En este capítulo se identifican los temas críticos que la Secretaría de Energía debe analizar, y la forma en que este modelo fortalecerá el análisis y las propuestas mexicanas.

La aplicación del modelo permitirá evaluar las políticas prioritarias para fortalecer la posición negociadora de México en el contexto internacional, analizar los cambios regulatorios en la región de Norteamérica derivados de las propuestas legislativas que se discuten en Estados Unidos referentes a los temas de seguridad energética y cambio climático, y estimar los costos y beneficios para el país de los cambios necesarios para lograr una economía de baja intensidad de carbono. De particular relevancia para la SENER (Secretaría de Energía), es la capacidad que el modelo brindará para evaluar, regional y globalmente, políticas energéticas tales como la inversión en fuentes de energía renovable, los impactos en el sector petrolero o el cambio de paradigma energético en el sector transporte.

Con esta información, la SENER contará con los elementos cuantitativos y cualitativos para atender nuevos compromisos internacionales para la reducción de emisiones al mismo tiempo que identificará las opciones para maximizar los esquemas de cooperación internacional para la transferencia tecnológica, el financiamiento internacional para la catalización de políticas en energía y medio ambiente, así como minimizar los impactos económicos de la transición energética.

El Centro Mario Molina ha establecido una alianza estratégica con el MIT a fin de facilitar a la SENER, y al gobierno mexicano en general, el acceso a la mejor investigación científica disponible para el diseño de políticas de cambio climático. Además de las ventajas descritas del modelo, de incorporar el estado del arte en la modelación del sistema climático y en la modelación económica, utilizar este modelo permitirá hacer evaluaciones comparativas de políticas climáticas con nuestros principales socios comerciales, toda vez que el modelo del MIT ha sido seleccionado como uno de los modelos de referencia para evaluar las legislaciones de cambio climático en Estados Unidos y ha sido ampliamente utilizado en Europa. Modelaciones para India, China, Japón y Corea se han llevado a cabo con este modelo por lo que también se propone realizar modelaciones de posibles alianzas con países de desarrollo medio y particularmente de Latinoamérica, con el fin de que México impulse los análisis sobre la región y pueda ser un líder en el fortalecimiento de su posición negociadora.

A continuación, se describen algunas de las posibles modelaciones de políticas públicas para el sector que se realizarían con el modelo del MIT, ampliando el módulo de México. Con el fin de ejemplificar las potencialidades del modelo, se describen las aplicaciones que se han hecho en otros países y que se han documentado en la serie de informes publicados por el Programa Conjunto de Ciencia y Política para el Cambio Global (*The MIT Joint Program for Science and Policy of Global Climate Change*) del MIT. El anexo de este documento presenta una lista detallada de los estudios elaborados con el modelo

seleccionado y para evaluar los aspectos científicos relacionados con la modelación del sistema climático y la economía.

Se ha utilizado el modelo del MIT haciendo uso del modelo global o solamente usando el componente económico. Es importante resaltar que no se ha trabajado sobre México en particular, pero que sobre todo en los reportes más recientes se han abordado temas de América del Norte, donde tener a México de manera más detallada sería crucial.

7.1. Modelación Integral para evaluar el Programa Especial de Cambio Climático y la meta aspiracional de México de reducir emisiones al 50% en el 2050 con respecto al año 2000

El gobierno mexicano ha establecido la meta aspiracional de una reducción de emisiones del 50% al 2050, en relación con las emitidas en el año 2000. Las acciones de mitigación contenidas en el Programa Especial de Cambio Climático 2009-2012 (PECC) señalan que de llevarse a cabo las acciones establecidas podrían reducirse en el periodo que abarca el PEEC, 51 millones de toneladas de CO_{2e}, con respecto al escenario tendencial (línea base al 2012 que ascendería a 786 MtCO_{2e}), como resultado de acciones desarrolladas en los sectores relacionados con la generación y uso de energía, agricultura, bosques y otros usos del suelo, y desechos.

La Secretaría de Energía es la dependencia responsable de coordinar las siguientes acciones de mitigación incluidas en el PECC:

Tabla 8. Medidas del PECC bajo la responsabilidad de SENER

Medidas del PECC responsabilidad de SENER	Mitigación Mt CO _{2e}	
	2008-2012	2012
Reinyección gas amargo en Cantarell	27.6	6.9
Fomento a proyectos de autoabastecimiento de energía eléctrica con fuentes renovables	3.65	3.65
Ahorro de energía por sustitución de electrodomésticos "Para Vivir Mejor" y focos incandescentes por lámparas ahorradoras	4.73	2.68
Eficiencia operativa en PEMEX	4.96	1.24
Generación eólica de CFE	2.40	1.20
Proyecto en la Central Termoeléctrica Manzanillo	1.10	1.10
Cogeneración en PEMEX	3.77	0.90
Proyecto de la central Hidroeléctrica La Yesca	0.81	0.81

Fuente: Programa Especial de Cambio Climático, Diario Oficial de la Federación del 28 de agosto de 2009.

Dichas acciones contribuirían con el 61% del objetivo de mitigación planteado por la administración. La propuesta de modelación permitiría evaluar costos de las acciones e identificar puntualmente los equilibrios macroeconómicos resultantes en este primer periodo de mitigación así como analizar nuevos escenarios que requieran de cambios estructurales en la economía para descarbonizarla. Las metas planteadas por el PEEC al 2012 contribuyen con aproximadamente el 7% de la reducción planeada por la meta aspiracional, y evidentemente, se puede considerar que son las acciones costo-efectivas seleccionadas por el gobierno por su factibilidad de ejecución en la presente administración. Las metas de mediano y largo plazo implicarían mayores costos por lo que se requiere de modelos para poder analizar los impactos económicos en el largo plazo.

Un punto crítico que el modelo podría reforzar es la integración de las curvas de costo marginal de mitigación sectoriales con las que actualmente cuenta el país, y que sirvieron de base para este primer programa, con modelos más robustos de análisis macroeconómico. El modelo EPPA fue aplicado para evaluar las implicaciones de extrapolar las curvas marginales de mitigación para análisis de políticas climáticas³⁶ de diversos estudios de referencia y con modelos heterogéneos. El análisis económico que se realizó para México hasta este momento considera curvas marginales de mitigación sectoriales derivadas de análisis con modelos reducidos “bottom-up” que no evalúan los efectos macroeconómicos. El estudio elaborado con el modelo EPPA muestra que la metodología y modelos para la estimación de las curvas de costo marginal de mitigación son sensibles a las políticas implementadas en otros países (es decir a los impactos de evaluar estas curvas considerando la macroeconomía internacional) y dependen en gran medida de su interacción con las políticas de mitigación de otros gases (contaminantes como el SO₂, NO_x y partículas) y no sólo de gases de efecto invernadero³⁷. El estudio concluye que en lo general, curvas de mitigación que no se relacionan directamente con las curvas de bienestar social en los modelos no deben utilizarse para derivar conclusiones sobre los cambios inducidos en el bienestar social, principalmente a largo plazo.

Las conclusiones del estudio sobre curvas de mitigación señalan que sería conveniente contar con curvas de mitigación derivadas de modelos complejos que sean consistentes con las condiciones de las políticas que se pretenden evaluar. Por esta razón, se propone que el modelo EPPA sea aplicado en México realizando un análisis integrado de las curvas para el sector energía. El EPPA ha sido aplicado ya con este propósito para Estados Unidos integrando al modelo EPPA un análisis detallado derivado de modelos bottom-up para el sector energía. Este tipo de modelaciones son muy complejas pero permiten integrar los análisis de bienestar general con políticas específicas en el sector, por lo que su información es extremadamente valiosa para evaluar los impactos de las políticas climáticas con modelos internamente consistentes.

³⁶ Morris, J., S. Paltsev and J. Reilly. Marginal Abatement Costs and Marginal Welfare Costs for Greenhouse Gas Emissions Reductions: Results from the EPPA Model. Joint Program Report Series, MIT, USA, 2008.

³⁷ McFarland James R., John Reilly and Howard J. Herzog. Representing Energy Technologies in Top-down Economic Models Using Bottom-up Information

Otras aplicaciones relevantes del modelo EPPA para México es su potencial para analizar los impactos de la política climática sobre el sector de refinación de petróleo³⁸. El modelo EPPA ha sido aplicado para el análisis de política energética en el marco de políticas climáticas a nivel global, particularmente en dicho sector. Por ejemplo, en Estados Unidos se utilizó el modelo EPPA para realizar un análisis preliminar de la localización de los aumentos en la capacidad de refinación considerando la dinámica de cambios estructurales esperados hacia crudos más pesados, cambios en la demanda de petrolíferos, y su interacción con políticas climática regionales. Dicho estudio consideró las tendencias que indican que se requerirá de una mayor capacidad de refinación de crudos cada vez más pesados al mismo tiempo que la demanda de productos petrolíferos más ligeros y limpios crece para abastecer el suministro de diesel, gasolinas y turbosinas con especificaciones ambientales más estrictas.

La creciente demanda de capacidad de refinación repercutirá en una mayor emisión de GEI de las refinerías, por lo que el estudio encontró que de existir una política climática regional en los Estados Unidos, se podría incentivar la ubicación del aumento de la capacidad de refinación en los países en desarrollo que no implementen medidas para mitigación de emisiones GEI, resultando en el efecto indeseado denominado *leakage* o fugas, en el que las emisiones se transfieren a otros países sin obtenerse beneficios ambientales. Para México, sería interesante realizar un estudio que evaluara los efectos en el sector petrolero de una política climática regional y/o nacional. El país también enfrenta un cambio estructural en la composición de su producción petrolera y además está considerando ampliaciones importantes en su capacidad de refinación de crudo por lo que podrían esperarse resultados similares a los obtenidos, y por tanto, deberían tomarse medidas, por ejemplo, para fomentar la amplia participación de todos los países a fin de evitar los problemas de *leakage* que podrían afectar sus exportaciones petroleras hacia las refinerías de Estados Unidos y/o aumentar sus costos.

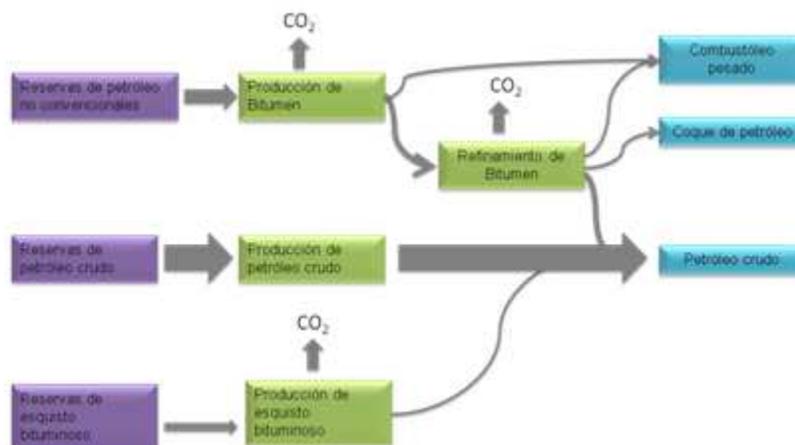


Figura 22. Procesos del sector petrolero “upstream” representados en el modelo EPPA

Fuente: Reilly (2007)

³⁸ Reilly John Sergey Paltsev and Frederic Choumert. Heavier Crude, Changing Demand for Petroleum Fuels, Regional Climate Policy, and the Location of Upgrading Capacity: A Preliminary Look. Joint Program Report Series, MIT, USA, 2007.

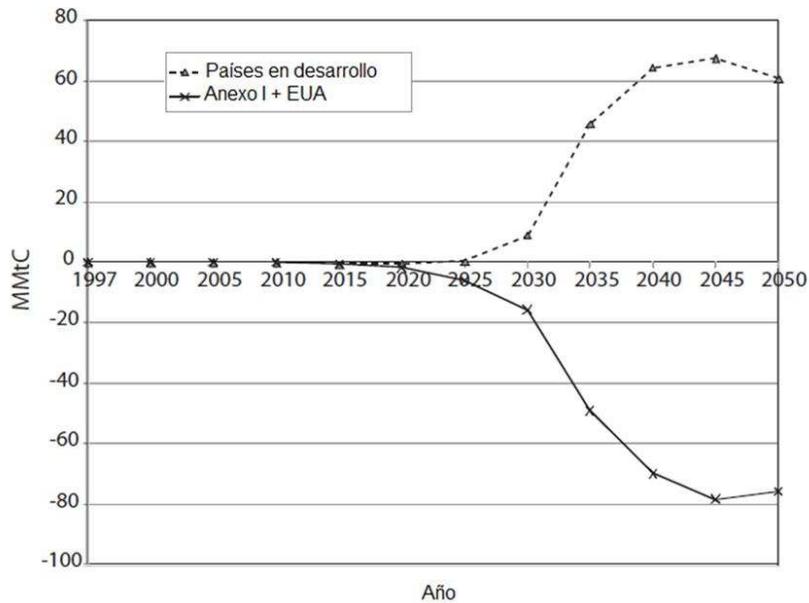


Figura 23. Resultados del Modelo EPPA. Cambios en las emisiones de CO2 derivadas de ampliaciones de la capacidad en el sector refinación de crudos más pesados y metas diferenciadas de emisión como las establecidas en el Protocolo de Kioto

Fuente: Reilly (2007)

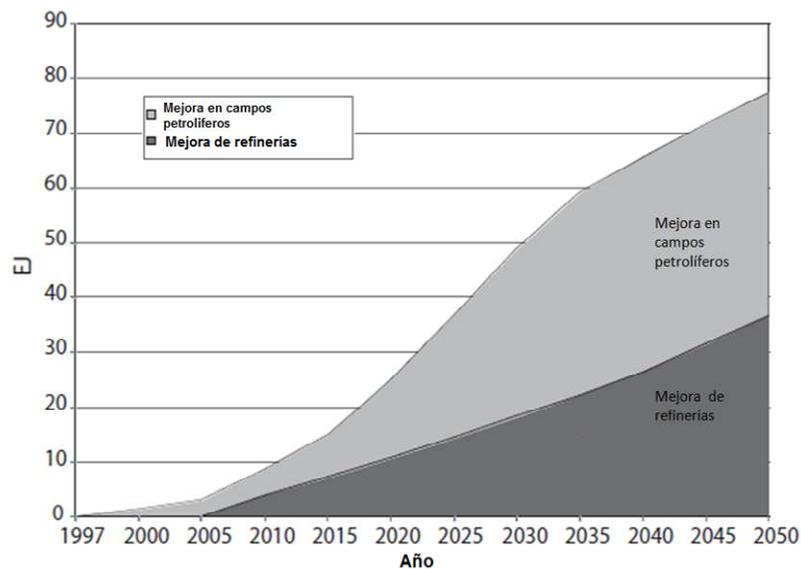


Figura 24. Resultados del modelo EPPA. Recomendaciones para el sector petrolero en el estudio del sector refinación en Estados Unidos

Fuente: Reilly (2007)

El modelo EPPA también ha sido ampliamente utilizado para evaluar los efectos de las políticas climáticas en el sector eléctrico³⁹. Los análisis del sistema energético mundial han señalado que para lograr estabilizar las emisiones de gases de efecto invernadero en el largo plazo se requerirá de la adopción a gran escala de tecnologías de cero emisiones o muy bajas emisiones de CO₂, tales como la energía eólica. Sin embargo, es claro que para que esto sea posible se requerirá de contar con la mejor información disponible sobre las externalidades asociadas a dicha fuente de energía y la solución de problemas inherentes a la tecnología eólica tales como su intermitencia. Una aplicación interesante de los modelos climáticos del MIT es el análisis de los impactos de la expansión a gran escala de la energía eólica. El estudio citado explora opciones de fiabilidad, sistemas de respaldo de la capacidad de generación, de líneas de transmisión, almacenamiento y los aspectos económicos y tecnológicos asociados. Incorporar a dicho análisis casos de estudio en México sería sumamente valioso para el sector eléctrico en el país, dado el alto potencial nacional de esta fuente energía renovable.

El modelo EPPA se alimentó de estos modelos para introducir nuevas tecnologías al análisis de equilibrio general computable de la economía mundial, así se consideró la generación a través de ciclos combinados sin y con captura y secuestro de carbono, así como sin y con regasificación en adición de las tecnologías convencionales fósiles, nucleares y con las energías renovables incluyendo la energía eólica y de biocombustibles. La modelación de ambos sistemas permitió analizar los flujos de inversiones y la penetración de las nuevas tecnologías, la cual es una función del precio de los combustibles y de otros insumos, así como de los ajustes de la política climática que establezcan en el futuro un costo a las emisiones de carbono.

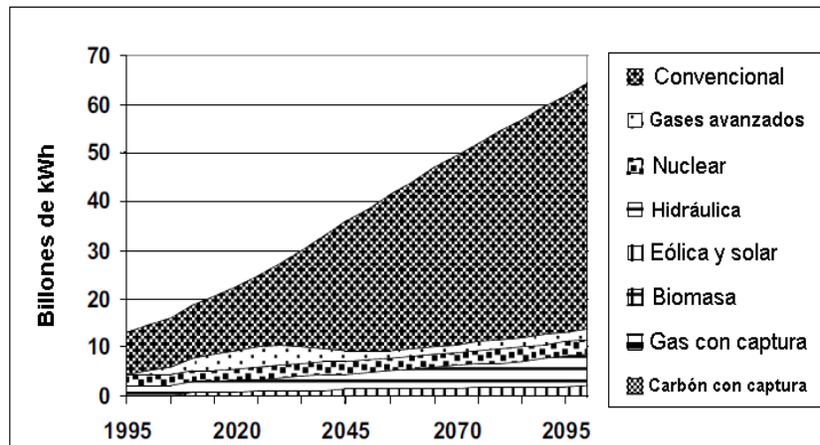


Figura 25. Escenario base de la matriz de generación de electricidad en Estados Unidos

Fuente: McFarland (2002)

³⁹ Wang, C., and R. Prinn. Climatic Impacts and Reliability of Very Large-Scale Wind Farms. Joint Program Report Series Potential (June 2009)

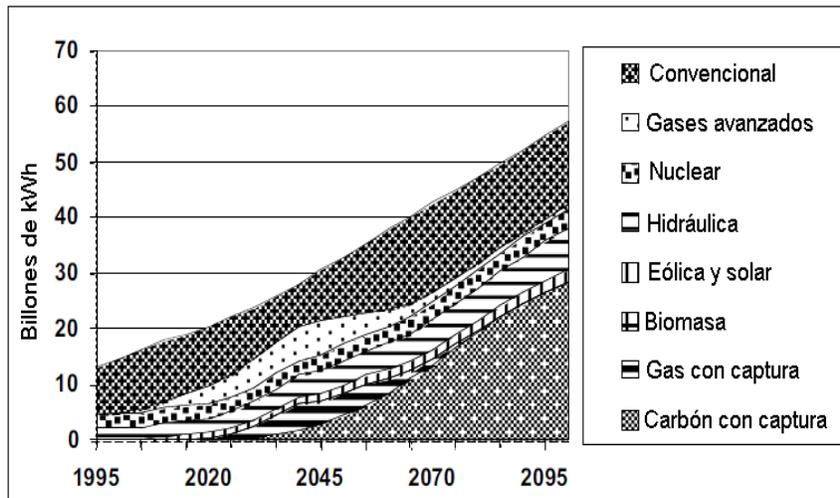


Figura 26. Escenario de la matriz de generación de electricidad en Estados Unidos con un impuesto al CO₂

Fuente: McFarland (2002)

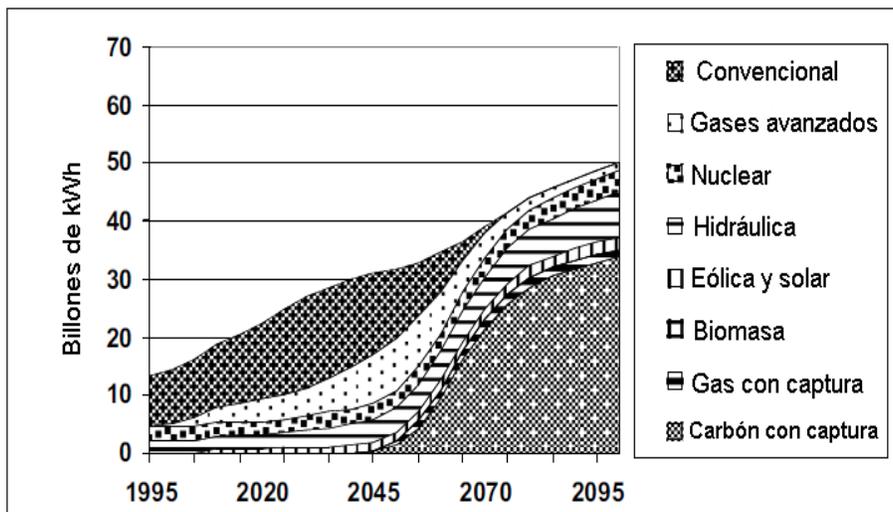


Figura 27. Escenario de la matriz de generación de electricidad en Estados Unidos en un escenario de estabilización atmosférica

Fuente: McFarland (2002)

En uno de los estudio del MIT⁴⁰, se encuentra una conclusión en el sentido de que las tecnologías de ciclo combinado a gas natural, aunque actualmente son las menos costosas, en el largo plazo se estima que jugarían un papel limitado, mientras que para el

⁴⁰ McFarland James R., John Reilly and Howard J. Herzog. Representing Energy Technologies in Top-down Economic Models Using Bottom-up Information. Joint Program Report Series (October 2002)

2050 se proyecta que las plantas de carbón con captura y secuestro de carbono (CCS por sus siglas en inglés), a pesar de que actualmente es una de las tecnologías más costosas, resulta una tecnología primordial debido a que los escenarios de política prevén incrementos importantes al precio del gas natural.

El Centro Mario Molina ha iniciado ya trabajos de evaluación de la tecnología CCS en México. Se ha propuesto la creación y coordinación de un grupo científico y técnico de captura y almacenamiento geológico de CO₂ en el que participen científicos y técnicos nacionales e internacionales, así como funcionarios de PEMEX y CFE. En adición, se ha realizado ya un análisis de las experiencias internacionales de CCS, en especial aquellas donde sea usado el coque de petróleo como combustible base. Ello permitirá abordar los temas de desarrollo en México junto con las principales instituciones de investigación energética del sector. Los resultados de estos trabajos podrán alimentar al modelo EPPA para las modelaciones en México a fin de brindar mayor información sobre el uso de estas tecnologías.

El modelo EPPA también ha sido utilizado para evaluar los impactos de la política climática en la reducción de la contaminación atmosférica⁴¹. Para México este es un tema fundamental. Actualmente se encuentra en revisión la NOM-085 y otras normas ambientales que establecen límites de emisión para las instalaciones del sector. También se elaboran, modifican y actualizan programas estatales y locales para mejorar la calidad del aire, en los que participan activamente las empresas del sector, por su relevancia en las emisiones. El modelo EPPA ha sido ampliamente aplicado para evaluar políticas climáticas y de reducción de otros contaminantes atmosféricos ya que los procesos de combustión que generan las emisiones de GEI son los mismos que generan otros contaminantes. Los modelos del MIT permitieron un análisis detallado de los efectos del control de la contaminación atmosférica en el clima así como de los costos de la contaminación atmosférica.

Algunos efectos importantes que deben de analizarse particularmente de metas ambiciosas de reducción de emisiones, son sus potenciales efectos negativos en la generación de desempleo. El modelo EPPA ha sido utilizado para evaluar los efectos de dos imperfecciones de mercado en el corto plazo: la rigidez en los mercados laborales y la rigidez en el ajuste de los salarios en algunos sectores⁴². El modelo se aplicó en Estados Unidos con el objeto de evaluar políticas laborales que acompañaran a las políticas climáticas, y así evitar efectos indeseables de la reducción de emisiones. En ausencia de políticas paliativas el modelo encontró que para la economía de Estados Unidos podrían esperarse aumentos en el desempleo del orden de 4% asociados a la política climática, pero que dichos efectos pueden neutralizarse con políticas adecuadas, por lo que evaluar dichos impactos y las políticas laborales necesarias es muy importante en México.

⁴¹ Prinn Ronald, John Reilly, Marcus Sarofim, Chien Wang and Benjamin Felzer. Effects of Air Pollution Control on Climate véase también Selin, N.E., S. Wu, K.-M. Nam, J.M. Reilly, S. Paltsev, R.G. Prinn and M.D. Webster. Global Health and Economic Impacts of Future Ozone Pollution, Joint Program Report Series (August 2009)

⁴² Babiker, M., and R.S. Eckaus Unemployment Effects of Climate Policy Joint Program Report Series (July 2006)

Las políticas energéticas, ambientales y comerciales tienen una estrecha relación, misma que puede ser analizada con el modelo EPPA⁴³. Un ejemplo de éstas, son las políticas aplicables al sector transporte. El sector transporte tiene una contribución muy importante en las emisiones de gases de efecto invernadero y se espera que incremente, dado el aumento de la demanda de automóviles a diesel y gasolina. La política ambiental para establecer límites de emisión y la introducción de nuevas tecnologías no es suficiente, ya que se requiere un análisis integral del ciclo de vida de las tecnologías que permita atender la problemática compleja que involucra aspectos ambientales, de comercio internacional, energéticos, etc.

En México, por ejemplo, se tiene el problema de la importación desde los Estados Unidos de los carros chocolates, misma que podría incrementarse de establecerse límites más estrictos en materia de cambio climático, por lo que es importante armonizar políticas en la materia. El modelo propuesto permite brindar información en varios sentidos por ejemplo análisis de normas ambientales, estándares de eficiencia energética, y afectaciones en otros países por no incluir el ciclo de vida. Las complejas interacciones se esquematizan en las siguientes figuras.

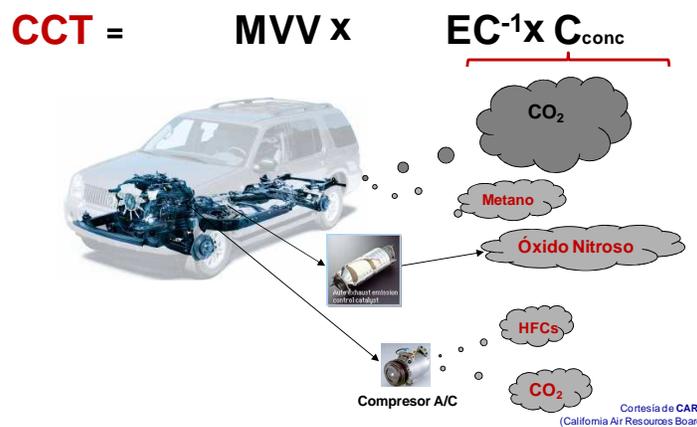


Figura 28. Carga de Carbono del Tiempo de Vida de los vehículos

Fuente: Lacy (2009)

⁴³ Ellerman, A.D., H.D. Jacoby and M.B. Zimmerman. Bringing Transportation into a Cap-and-Trade Regime, Joint Program Report Series (June 2006) y Schafer, A., and H.D. Jacoby. Technology Detail in a Multi-Sector CGE Model: Transport Under Climate Policy, Joint Program Report Series. (July 2003)

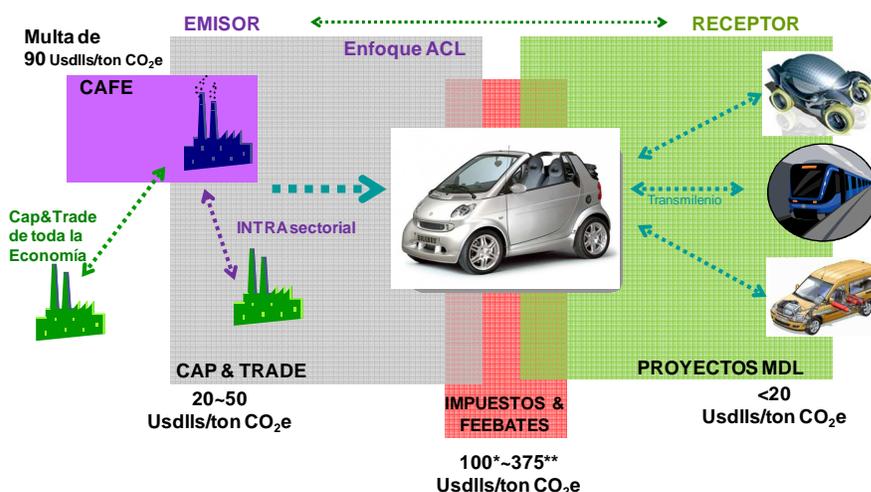


Figura 29. Costos Actuales y Posibles de la ton CO₂ en el Sector Automotriz

Fuente: Lacy (2009)

La política de fomento a los biocombustibles es quizá una de las más complejas desde el punto de vista de la modelación, puesto que requiere de detalle no sólo en los módulos del sector energía sino también en las componentes del sector agrícola, de uso de suelo y de impactos por deforestación y consecuentes implicaciones para la política de biodiversidad. El modelo EPPA ha sido ampliamente utilizado para analizar dichos impactos⁴⁴. Por ejemplo, se realizó para la Unión Europea un análisis de las implicaciones de la Directiva Europea de incrementar la participación de los biocombustibles para el sector transporte⁴⁵. Las conclusiones de dicho estudio que evaluó las consecuencias de incluir de forma desagregada los biocombustibles para el sector transporte en mezclas para las flotas a gasolina y diesel muestran que por sí sola la Directiva no genera cambios sustanciales de la flota a diesel, dada la estructura de impuestos y tarifas en la Unión Europea. El estudio realizó diversas recomendaciones de política fiscal para reducir los impactos en el sector transporte de la política de promoción de las energías renovables. Otros estudios han mostrado impactos por los cambios en los usos de suelo y sobre la biodiversidad, los resultados se presentan en las siguientes figuras.

⁴⁴ Melillo, J.M., A.C. Gurgel, D.W. Kicklighter, J.M. Reilly, T.W. Cronin, B.S. Felzer, S. Paltsev, C.A. Schlosser, A.P. Sokolov and X. Wang. Unintended Environmental Consequences of a Global Biofuels Program, Joint Program Report Series (January 2009) y Gurgel, A., J. Reilly & S. Paltsev Potential Land Use Implications of a Global Biofuels Industry, Joint Program Report Series (March 2008) y Reilly, J., and S. Paltsev Biomass Energy and Competition for Land, Joint Program Report Series (April 2007)

⁴⁵ Gitiaux, X., S. Paltsev, J. Reilly and S. Rausch Biofuels, Climate Policy and the European Vehicle Fleet. Joint Program Report Series, 2009

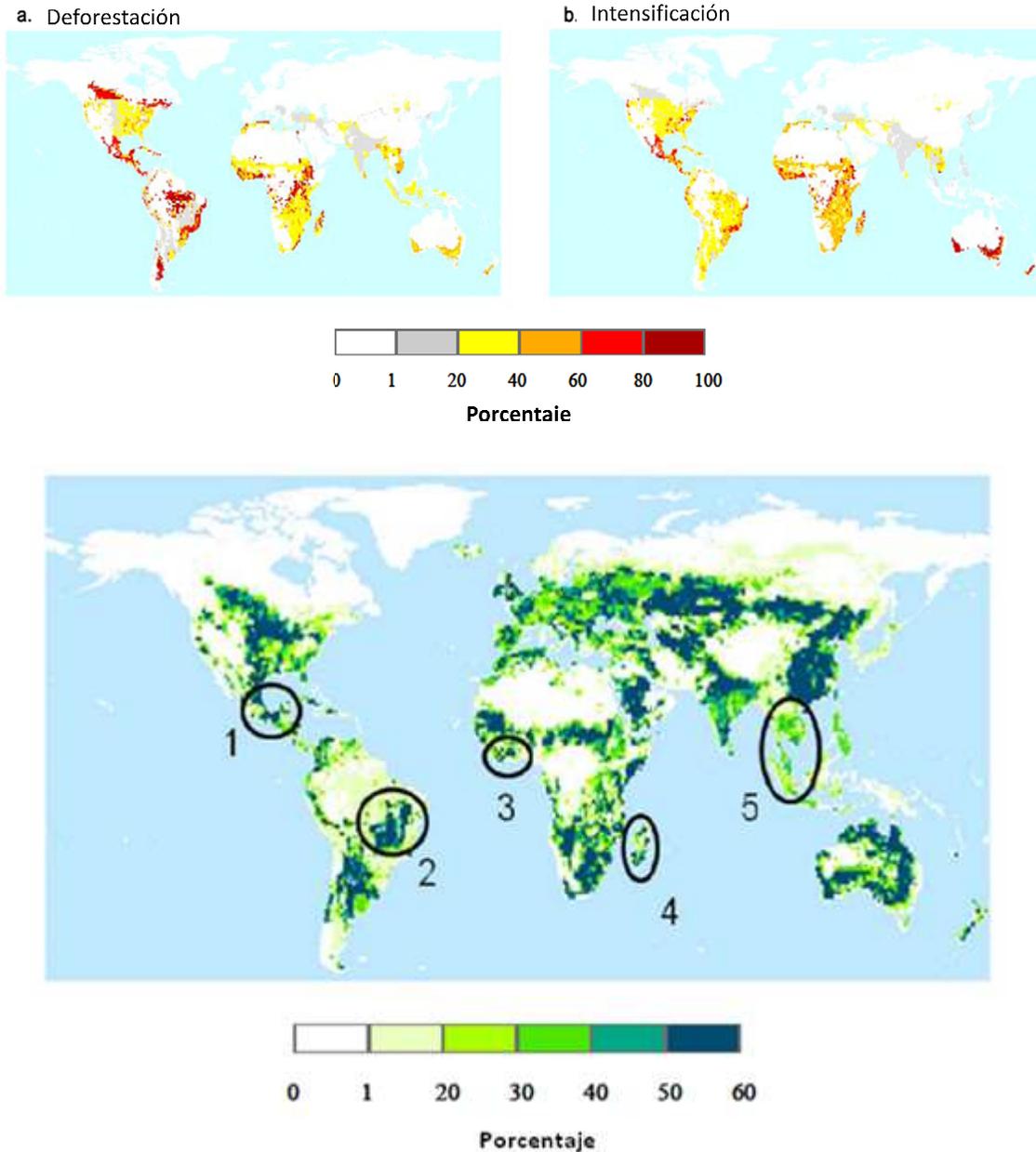


Figura 30. Resultados del modelo EPPA. Evaluación de efectos ambientales de las políticas globales de penetración de los biocombustibles. La figura superior muestra la intensificación de la deforestación y la figura inferior los usos de suelo agrícola y/o ganadera señalando focos de biodiversidad amenazados

Fuente: Melillo (2009)

7.2. Modelación para diseñar una política de mitigación de GEI conjunta de América del Norte

El modelo EPPA ha sido utilizado también para evaluar las propuestas de legislaciones de los Estados Unidos en materia de seguridad energética y cambio climático⁴⁶. Por la relevancia de Estados Unidos en la política global de mitigación de gases de efecto invernadero, para México es esencial diseñar su política adecuada considerando los cambios regulatorios en dicho país, no sólo por las implicaciones macroeconómicas globales sino por los efectos regionales de corto, largo y mediano plazo de las medidas que se tomen en Estados Unidos.

Los últimos análisis realizados con el modelo EPPA evalúan las implicaciones de la propuesta de energía limpia y seguridad energética presentada por el Presidente Obama, misma que se encuentra en la Cámara alta del Congreso de los Estados Unidos. La iniciativa de Ley denominada *The American Clean Energy and Security Act of 2009* (iniciativa Waxman-Markey) contiene diversas estipulaciones que son de interés para México, y que podrían evaluarse si se ampliara el marco de modelación actual considerando al país de forma detallada.

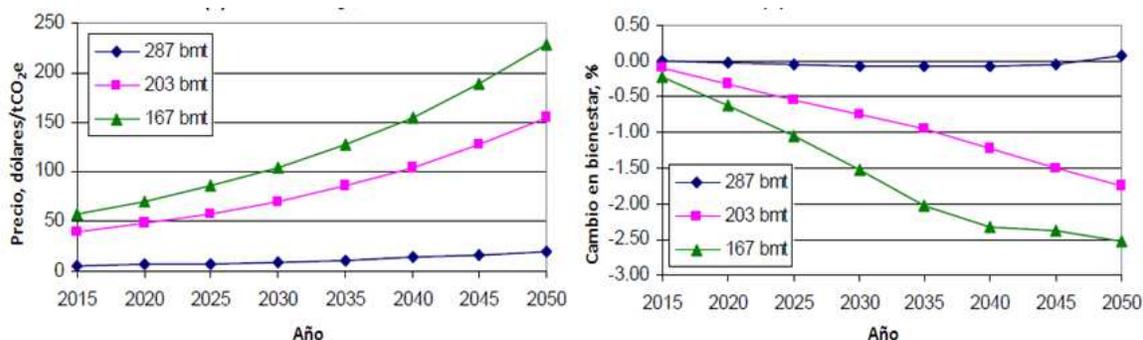


Figura 31. Resultados del Modelo EPPA para evaluar los costos de distintos límites de emisiones en Estados Unidos de la propuesta de ley The American Clean Energy Act. Precios por ton de CO₂ y Cambios en el bienestar social

Fuente: Paltsev et al (2009)

Un aspecto importante de la Ley para México son las estipulaciones para permitir el comercio de emisiones con países que establezcan políticas de cambio climático y apoyos a la transferencia tecnológica. Asimismo, es de interés del país contar con un

⁴⁶ Paltsev, S., J.M. Reilly, H.D. Jacoby and J.F. Morris. *The Cost of Climate Policy in the United States*, Joint Program Report Series (Sept. 2009); Parsons, J.E., A.D. Ellerman and S. Feilhauer, *Designing a U.S. Market for CO₂*, Joint Program Report Series (February 2009); Gurgel, A., S. Paltsev, J. Reilly and G. Metcalf, *U.S. Greenhouse Gas Cap-and-Trade Proposals: Application of a Forward-Looking Computable General Equilibrium Model*, Joint Program Report Series (June 2007); Babiker, M., M.E. Bautista, H.D. Jacoby and J.M. Reilly, *Effects of Differentiating Climate Policy by Sector: A U.S. Example*, Joint Program Report Series (May 2000); Metcalf, G.E., S. Paltsev, J. M. Reilly, H.D. Jacoby & J. Holak, *Analysis of U.S. Greenhouse Gas Tax Proposals*, Joint Program Report Series (April 2008)

modelo que permita evaluar las afectaciones derivadas de posibles estipulaciones arancelarias a productos en base a su contenido de carbono, las cuales han sido siempre un tema controversial de las propuestas de legislación de dicho país.

La homologación de las políticas climáticas en América del Norte es, sin lugar a dudas, un tema en el que el modelo EPPA podría aportar elementos de discusión invaluable, si contase con la información detallada de México. En enero de 2009, se realizó el Seminario de Gobernabilidad Regional para el Cambio Climático en Norte América, mismo que reunió a distinguidas instituciones académicas y de investigación de los tres países, así como a representantes de instancias gubernamentales, para evaluar los elementos de una posible política trilateral en la materia. Los beneficios de contar con una estrategia de múltiples niveles y políticas podrían ser altos para la región, lo cual se podría evaluar usando un modelo robusto como el EPPA que contenga información detallada para los tres países.

A continuación se señalan algunos de los aspectos más críticos que se propone evaluar para México contenidos en dicha propuesta legislativa “Waxman-Markey”. La propuesta de Ley básicamente propone:

- Establecer estándares a los generadores de energía para llegar a tener hasta un 20% de la demanda de energía a través de fuentes renovables y eficiencia energética,
- Fija metas y requiere la creación de un plan estratégico para mejorar la productividad global del sector energético por lo menos en un 2.5% anual a partir de 2012 e irlo mejorando hasta 2030,
- Establece un sistema de comercio de gases de efecto invernadero (Cap & Trade, por sus siglas en Inglés).

El sistema de emisiones que se está proponiendo establece permisos de emisión anuales a partir de 2012 e incluye todos los GEI contemplados en el Protocolo de Kioto, más el Trifluoruro de nitrógeno (NF3) , sin embargo en el caso de los gases fluorinados se tendrá un sistema separado. La administración de estos mercados correrá a cargo de la Environmental Protection Agency (EPA) y el departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA).

En dicha ley, se establecen también metas claras de disminución que tendrán repercusión en las emisiones globales del país tomando como base el año 2005. En la siguiente tabla se enlistan las reducciones esperadas:

Tabla 9. Metas de reducción de emisiones en la economía de E.U.A.

Año	Metas de reducción
2012	-3%
2020	-17%
2030	-42%
2050	-83%

Fuente: Elaborado por CMM con base en H. R. 2454, The American Clean Energy and Security Act

Como en todo sistema Cap & Trade uno de los factores clave es la distribución de permisos y los responsables de estos, el resultado para el sistema propuesto es una

mezcla de enfoques que varían de acuerdo al sector (ver Tabla 10) y que cubren aproximadamente el ochenta y cinco por ciento de la economía americana, lo cual representa cerca de 6 billones de toneladas de CO₂ equivalente. En la misma ley se establece que se distribuirá libremente el 80% de los permisos entre los actores de cada sector y partiendo de 2012 irán disminuyendo cada año. Se hará también una revisión periódica del estado del arte de la ciencia cada cuatro años (sección 705 de la propuesta de Ley) para hacer los cambios y actualizaciones pertinentes, además se mantendrán 2.5 billones de toneladas métricas de los permisos como reserva estratégica (sección 726 de la propuesta de Ley).

Tabla 10. Distribución de Permisos

Etapa	Sector económico	Enfoque	Responsable
Primera (2012)	Energía	Downstream	Plantas de generación y distribución de energía (Eléctrica)
	Transporte	Upstream	Refinadores y formuladores (Petróleo y combustibles líquidos)
	Gases Fluorinados	Upstream	Productores e importadores
Segunda (2014)	Industria (grandes)	Downstream	Plantas industriales que emitan más de 25 mil toneladas de CO ₂ equivalente por año
Tercer (2016)	Industria (pequeñas)	Downstream	Plantas productoras
	Comercial	Midstream	Compañías de distribución de gas Natural
	Residencial	Midstream	Compañías de distribución de gas Natural

Nota: HFC's cuentan con un sistema propio de Cap & Trade.

Fuente: Elaborado por CMM con base en H. R. 2454, The American Clean Energy and Security Act of 2009 (Sección 722), aprobada en Junio 2009.

En particular la parte interesante para México se refiere a la posibilidad de participar de la reducción de emisiones por medio de los llamados “offsets” ó “compensaciones”. La ley establece (sección 722) que del total de emisiones de CO₂ que se contemplan en el mercado y a las cuales están obligados los responsables a cubrir pueden ser compensadas hasta por una cantidad de 2 billones de toneladas (1 billón por medio de proveedores nacionales y el resto por internacionales). Adicionalmente se autoriza al administrador a aumentar la cantidad de compensaciones internacionales a 1.5 billones en caso de que las compensaciones nacionales sean insuficientes.

No se establece límite para participar de las compensaciones internacionales, simplemente se especifican ciertos requisitos como: ser país en vías de desarrollo (de acuerdo a la OECD), el contar con un convenio bilateral ó multilateral, tratado o memorándum de entendimiento más los requisitos que defina el administrador quien contará con un comité de evaluación (Offsets Integrity Advisory Board) el cual definirá la lista de proyectos elegibles, así como la revisión de metodologías, líneas base y en

general cualquier otro asunto relevante que a las compensaciones compete (sección 731 de la propuesta de Ley). La verificación, supervisión y auditoría de las compensaciones será responsabilidad de una tercera entidad acreditada y que será también auditada por el administrador (sección 735-738 de la propuesta de Ley).

Se ofrecerán también créditos internacionales de compensación especiales divididos en tres rubros (sección 743):

- Créditos sectoriales
- Organismos Internacionales
- Deforestación

Los créditos sectoriales (mismos sectores que comprende el mercado de emisiones de E.U.A.) se ofrecen con la finalidad de minimizar las potenciales fugas de industria y para ayudar a los países beneficiados a emprender acciones en busca de la disminución de emisiones de GEI. Requerirán, además de los puntos anteriormente mencionados un perfil de cada país, sus acciones emprendidas contra el cambio climático, el nivel de sus emisiones y/o nivel socio-económico; sin embargo es conveniente mencionar que no se expedirán créditos para proyectos basados en la destrucción de hidrofluorocarbonos.

Los créditos que aplicarán a organismos internacionales para que estos mismos otorguen créditos como los mecanismos de desarrollo limpio (MDL) otorgados por la Convención Marco contra el Cambio Climático (UNFCCC por sus siglas en inglés) u otros mercados de carbono, sin embargo en el caso específico de los MDL únicamente se aceptaran hasta 2016.

Se establecerá particularmente uno enfocado al sector forestal para reducir las emisiones de GEI debido a la pérdida de bosques que se aplicará por proyectos ó por sector dependiendo de ciertos requisitos, además es posible –mediante aprobación del administrador y la junta de consejo- actividades como degradación de bosques, pérdida de carbón en suelo asociadas con humedales de relevante importancia, sin embargo se excluyen todos los proyectos que sean desarrolladas en el marco de algún otro convenio o tratado internacional que impliquen una obligación del país beneficiado para reducir sus emisiones de GEI ó para incrementar el secuestro y fijación de carbono. En la siguiente tabla se mencionan algunos de ellos.

Tabla 11. Algunos de los requisitos para acceder a los créditos de compensación por reducción de Deforestación

Sectorial	Proyecto
> 1% de emisiones de CO ₂ , totales, y/o	< 1% de emisiones de CO ₂ , totales
> 3% de emisiones de deforestación CO ₂ , y/o	< 3% de emisiones de deforestación CO ₂ , y/o
Establecer un Plan estratégico para alcanzar Deforestación "0" a 20 años	
Probada capacidad institucional, así como capacidad para medir, reportar y verificar e información mínimo de 5 años atrás y establecer una línea base nacional	
Adicionalidad basada en la Línea base menos las acciones unilaterales emprendidas por cada país beneficiado (políticas naciones e internacionales)	
La reducción de emisiones se debe llevar a cabo antes de la emisión del crédito	

Sectorial	Proyecto
Tomar en cuenta a las localidades implicadas (indígenas donde aplique) y aspectos de sustentabilidad	
Revisión cada 5 años y posible extensión por hasta 8 años	

Fuente: Elaborado por CMM con base en H. R. 2454, The American Clean Energy and Security Act of 2009 (Sección 743), aprobada en Junio 2009.

Por otro lado se establece también en la sección 751-756 otro paquete suplementario de acciones para la reducción de emisiones por Deforestación dirigido entre otras cosas a construir capacidades y crear mercados de reducción de emisiones en países en vías de desarrollo (menos desarrollados) a través de la agencia de ayuda USAID. Dichas acciones ser realizarán para alcanzar hasta 720 millones toneladas de CO₂ equivalente al 2020 acumulando al 2025: 6 billones de toneladas más. Para participar de este paquete se requiere: ser identificado por el administrador y la agencia USAID como país susceptible a perder gran cantidad de bosques debido a la deforestación, cumplir con ciertos estándares establecidos por los mismos actores además de contar con un convenio bilateral o multilateral. Pasados cinco años se hará una revisión de la situación para saber si se han alcanzado logros significativos.

En cuanto a la disposición de las compensaciones estas son definidas por la ley otorgando una cantidad o porcentaje fijo que se irá ajustando cada año de acuerdo al sector y responsable independientemente de la situación económica del año en cuestión. Cada permiso equivale a una tonelada de emisión de CO₂ equivalente durante el periodo correspondiente, así mismo los actores responsables participantes podrán vender, subastar, regalar o donar sus permisos de emisión a otros participantes que no hayan cubierto su cuota y refiere que en caso de no cumplir con sus respectivas responsabilidades los actores se harán acreedores a penalidades (Sección 782-792).

Para asegurar reducciones reales en emisiones industriales y prevenir el incremento de emisiones de los Estados Unidos así como prevenir la fuga de capitales en el Título IV (sección 762-) se propone tener compensaciones para la industria nacional y promover acciones sustantivas en países en vías de desarrollo rápido encaminadas a reducir las emisiones de GEI globales particularmente ligadas a el "Plan de acción de Bali" bajo la UNFCCC.

Debido a lo anterior se compensará a la industria de manufactura de Estados Unidos. Se hará una comparación de productos nacionales en contra de ciertos productos ó bienes sean provenientes del extranjero de alguno de los sectores identificados por el administrador (respecto a código North American Industrial Classification System - NAICS- de 2002 en sus apartados 31, 32 y 33 así como con respecto al documento: Harmonized Tariff Schedule of the United States). Se identificará si existe una competencia desleal en términos de los costos directos e indirectos por la disminución de GEI (excluyendo costos de producción) por parte de países cuyos compromisos, obligaciones y leyes respecto a la reducción de emisiones GEI sean menores ó más laxos con respecto a los de Estados Unidos y que consecuentemente ofrecerán sus productos a un costo más bajo, lo que ocasionaría mayor venta y por ende mayores emisiones a la atmósfera. Los factores básicos para determinar quien se hace acreedor a los reembolsos son: factores económicos que incluyan la energía usada o la intensidad energética (por lo menos 5%) así como la intensidad de comercio (por lo menos 15%) ó si la energía usada o la

intensidad energética exceden de 20% del sector o subsector (Ver sección 763 de la propuesta de ley).

La lista definitiva de los sectores de manufactura elegibles para este apartado se presentará a más tardar el 30 de Junio de 2011 y se actualizará el primero de febrero de los años subsecuentes, sin embargo en la ley aprobada se presentan algunos sectores industriales que pudieran ser elegibles para tal efecto. Se cubrirá presumiblemente en general a toda industria que se beneficie ó procese: generación de energía y calor, minerales metálicos (incluyendo Hierro y Cobre), sosa comercial, fosfatos, excluyendo a la industria de extracción de los mismos. Se evaluará de acuerdo a la producción del sector ó subsector. Por ejemplo, el sector cemento tiene una producción de cemento hidráulico no clinker.

Los reembolsos de emisiones se efectuaran a más tardar el 31 de Octubre de cada año con base en ajustes a los factores de emisión directos ó indirectos (2012-2013) para los años subsecuentes a partir de 2026 se realizará de acuerdo a la cantidad calculada por un porcentaje que disminuirá cada año. Dichos reembolsos buscarán beneficiar la innovación y la mejora en la eficiencia energética.

Las excepciones de aplicación serán (sección 768):

- Sector Petróleo
- Países menos desarrollados (de acuerdo con Naciones Unidas)
- Países que aporten menos del 0.5 por ciento del total de las emisiones globales
- Cualquier país en el que el producto o sector en conflicto cumpla ó exceda los estándares fijados por el administrador (por ejemplo: el sector Cemento en México es más eficiente que en E.U.A. debido que en México la mayoría del proceso es seco, por tanto es menos intensivo).

Establece además un fondo para transferencia tecnológica de energías limpias (Sección 441 subtítulo D) para ayudar a países en vías de desarrollo. Ningún país podrá ser acreedor a más del 20% del total de los fondos, deberá tener un convenio o tratado internacional firmado y además deberá tener acciones ya emprendidas (unilaterales) para reducir emisiones de GEI, así como capacidad para reportar sus avances. Por su puesto todas las actividades y proyectos que se registren no deberán recibir créditos por compensación de GEI. Las áreas en las que se enfoca el fondo son:

1. Captura y secuestro geológico de carbono (CCS por sus siglas en Inglés),
2. Energías renovables (solar, eólica, biocombustibles, geotérmica, marina e hidrokinetica),
3. Eficiencia en transmisión, distribución y consumo de energía eléctrica,
4. Desarrollo de tecnologías bajas o cero emisiones que presentan barreras para su desarrollo,
5. Eficiencia en el transporte,
6. Reducción de emisiones de carbón negro,
7. Construcción de capacidades,

8. Asesoría, desarrollo e implementación de tecnologías y políticas contra los GEI, etc.

Por último se cuenta con un programa internacional de adaptación al cambio climático con el cual se proveen fondos para asistir a los países en vías de desarrollo para implementar programas de adaptación al cambio climático para reducir la vulnerabilidad de sus sociedades a los impactos del cambio climático. La ayuda se proporcionará a través de USAID, convenios ó tratados bilaterales ó multilaterales, internacionales ó una combinación de estos últimos y existirá prioridad para los países más vulnerables. Se actuará por medio del impulso a políticas públicas, estrategias de acción, construcción de capacidades, adaptación, reducción de la vulnerabilidad y desarrollo de tecnologías en áreas como:

1. Disponibilidad de agua
2. Agricultura
3. Inundaciones
4. Recursos costeros
5. Biodiversidad
6. Salud y enfermedades
7. Sustento económico
8. Migración

La propuesta de modelación identificará políticas específicas que se consideren estratégicas para México y que puedan catalizar los posibles beneficios para el país de participar activamente, y posiblemente como socio privilegiado dadas las alianzas comerciales del TLCAN, en los futuros mercados de CO₂ en los Estados Unidos.

7.3. Modelación de implicaciones económicas para México de alternativas de acuerdos internacionales para el esquema de mitigación post-Kioto

Es prioritario para México poder evaluar las implicaciones económicas de las distintas alternativas de mitigación que se discuten actualmente en el marco de la Convención Marco de Naciones Unidas en materia de cambio climático. El Protocolo de Kioto cumplirá en el año 2012 su primer periodo de cumplimiento y tras los acuerdos alcanzados en la Cumbre de Bali, y las negociaciones internacionales que se llevan a cabo y se espera logren un nuevo acuerdo internacional en Copenhague o a más tardar en México en el 2010, el país se encuentra ante la posibilidad de nuevos compromisos internacionales.

Los resultados de los modelos globales son contundentes en señalar que, en todos los escenarios proyectados, se requerirán de acciones de mitigación a una escala sin precedente para descarbonizar la economía mundial. Cambios estructurales en el sector energético son sin lugar a dudas un elemento central en todas las alternativas de mitigación propuestas. Los modelos globales han también identificado que sin una participación amplia de todos los países, o en su defecto de los países cuyas emisiones son más relevantes a nivel global, el costo asociado a la mitigación sería sumamente elevado para los países que adquieran compromisos de mitigación.

México ha tomado una posición proactiva y ha iniciado acciones concretas para colaborar en la mitigación del cambio climático. Sin embargo, es necesario que con el fin de reforzar sus propuestas de cooperación internacional, el país cuente con información precisa sobre las implicaciones económicas de los nuevos acuerdos. El modelo EPPA ha sido aplicado para evaluar los costos a nivel internacional de distintas metas de reducción de emisiones y proporciona información sobre los efectos de una participación diferenciada en la mitigación sobre sectores estratégicos tales como impactos en el comercio internacional, en el flujo de inversiones y en el incremento en el costo global de mitigación.

Por ejemplo, el modelo EPPA se utilizó para evaluar los efectos de una meta de reducción de 50% de las emisiones globales del G8 en el 2050⁴⁷. El modelo fue modificado para permitir determinar de manera endógena la repartición de la carga de mitigación entre los países, a través de simular un mercado de emisiones entre los principales emisores y definir cuál sería la “asignación óptima” de permisos de emisión. Se realizaron diversas modificaciones a dicha asignación “óptima” con el fin de considerar alternativas políticas de repartición de techos máximos de emisión. El modelo permite analizar los distintos flujos financieros implícitos en el comercio de emisiones bajo diferentes escenarios de metas de mitigación por países. El estudio del MIT evaluó también distintas propuestas elaboradas por los países para considerar una mayor participación en la mitigación de emisiones, mismas que consideran indicadores de equidad y por tanto metas diferenciadas por país.

El resultado de dicho estudio mostró que la meta de reducción de 50% es agresiva y conlleva costos elevados y altas pérdidas de bienestar, por lo que para reducir los costos se requiere de una amplia participación internacional en la mitigación. Las diferencias en los costos y pérdidas de las distintas reglas de asignación de las metas nacionales de mitigación propuestas por diversos países, conllevan impactos significativos por lo que es necesario considerar cuidadosamente el diseño de la nueva propuesta post-Kioto. Por ejemplo, en el escenario en que los países en desarrollo son totalmente compensados por los costos incurridos en la mitigación, los países desarrollados experimentan pérdidas de bienestar de 2% cada miembro del G8 y de 10% en el 2050 conforme aumenta la mitigación. Las transferencias implícitas de este esquema serían de 400 billones de dólares por año hasta el 2020 para llegar a 3 billones de dólares en 2050. Las modelaciones permiten entender con mayor claridad la dirección de los flujos financieros de distintos esquemas, y evidentemente, la complejidad creciente de las negociaciones internacionales.

La última modelación que se propone realizar tiene el objetivo de evaluar otras posibles alianzas con países de desarrollo similar al de México. Entre ellos los países del G8+5 y en particular con Brasil y Sudáfrica. El modelo ha sido aplicado para evaluar futuros esquemas de cooperación internacional post-Kioto, sin embargo no se ha evaluado una alianza de países intermedios, lo cual podría ser una propuesta interesante por parte de México en el marco de las negociaciones que se llevan a cabo con grupos de países y en Naciones Unidas.

⁴⁷ Jacoby, Henry D. Mustafa H. Babiker, Sergey Paltsev, and John M. Reilly, *Sharing the Burden of GHG Reductions*. Joint Program Report Series (November 2008)

Tabla 12. Resultados del modelo EPPA para evaluar costos de distintos esquemas post-Kioto de cooperación internacional para la mitigación

Transferencias internacionales netas, en billones de dólares del año 2000, resultado del comercio internacional de emisiones en 2020 y 2050					
	Regla de asignación			Compensación completa	
	30-70	Base poblacional	PIB de referencia	C1	C2
2020					
Anexo I					
Estados Unidos	-30.3	-368.7	-483.5	-196.7	-264.5
Canadá	-2.7	-36.2	-36.4	-20.0	4.5
Japón	-13.1	-47.4	-92.6	-44.8	-118.9
Australia y Nueva Zelanda	-5.2	-32.3	-29.2	-18.5	-8.8
Unión Europea	-12.3	-127.7	-270.1	-116.9	-86.3
Europa del Este	8.6	-9.3	36.9	-9.9	3.2
Unión Soviética	41.0	-27.1	-9.1	-26.7	44.6
No-Anexo I					
México	0.1	-3.8	22.9	16.4	14.6
Asia del este de alto ingreso	-23.7	-87.9	-122.8	-13.8	-14.9
China	69.4	222.5	26.7	73.9	74.4
India	10.1	232.7	439.7	51.8	52.3
Indonesia	-10.1	33.1	238.6	8.0	8.2
África	-10.8	154.9	220.0	81.2	79.3
Medio Oriente	-32.3	-59.5	-40.2	119.4	116.5
Centro y Sudamérica	-0.8	23.6	-57.1	62.7	61.3
Resto del Mundo	12.2	133.1	156.0	33.9	34.4
Neto Anexo I	14.0	648.7	883.9	433.5	426.2
2050					
Anexo I					
Estados Unidos	-179.6	-668.8	-1024.0	-1239.4	-1715.5
Canadá	-35.7	-87.2	-93.6	-148.8	2.1
Japón	-172.8	-187.3	-288.6	-358.6	-942.1
Australia y Nueva Zelanda	-30.1	-72.7	-70.3	-120.5	-78.6
Unión Europea	-195.9	-299.9	-715.6	-866.1	-985.3
Europa del Este	-9.1	-15.5	119.4	-146.9	7.1

Unión Soviética	-44.2	-58.8	0.8	-434.3	299.9
No-Anexo I					
México	31.5	-9.2	66.7	108.4	110.1
Asia del este de alto ingreso	130.5	-131.2	-241.3	355.8	363.8
China	484.0	577.1	80.8	589.0	578.3
India	14.7	513.9	1056.3	176.4	189.5
Indonesia	-40.9	32.9	574.1	85.0	91.2
África	43.4	373.1	609.7	543.0	558.7
Medio Oriente	77.4	-15.4	51.1	761.1	797.3
Centro y Sudamérica	-81.9	-158.6	-428.3	536.8	556.7
Resto del Mundo	8.6	207.6	302.9	159.1	167.0
Neto Anexo I	667.3	1390.3	2071.9	3314.6	3412.5

Notas: Resultados en las transferencias internacionales de distintas reglas de distribución de las cargas de mitigación y escenarios de compensación completa de los costos de mitigación en países en desarrollo. 1) Regla de asignación 30-70 se refiere a una distribución al 2050 con 30% de las emisiones a países desarrollados y 70% a países en desarrollo, 2) Base poblacional: se refiere al escenario en que la mitigación se distribuye considerando la población total de los países, 3) PIB de referencia se refiere a una regla de distribución considerando el tamaño de las economías. Las reglas de compensación a países desarrollados se refiere a las transferencias para ayuda a la mitigación. C1 se refiere a la compensación de todos los costos considerando una como línea base las emisiones de los países en el año 2000; C2 se refiere a una distribución que repartiría el costo de forma equitativa entre los países desarrollados

Fuente: Jacoby et al (2009)

Además de los Estados Unidos, el modelo EPPA ha sido aplicado para evaluar políticas internas en otros países tales como la Unión Europea y Japón. El PECC señala que únicamente a través de esfuerzos coordinados de la comunidad internacional podría alcanzarse la meta aspiracional de reducción de emisiones al 2050. Esta conclusión ha sido reforzada en la evaluación de políticas específicas evaluadas en Japón, India y la Unión Europea que concluyen que la cooperación internacional a través del comercio de emisiones es un elemento clave para lograr los objetivos de largo plazo.

México podría evaluar establecer un mercado de comercio de emisiones o impuestos a las emisiones de CO₂ para alcanzar su meta aspiracional en el futuro. Las conclusiones relevantes de estudios similares con el modelo EPPA en estos tres estudios de caso se presenta a continuación.

El modelo EPPA fue utilizado para analizar tres casos sobre opciones para la reducción de GEIs en el marco del cumplimiento del Protocolo de Kioto. Los estudios examinan los impactos económicos de estas medidas en Japón, India y 9 países de la Unión Europea. En los tres casos se hace la comparación entre realizar acciones para la mitigación de índole exclusivamente doméstico, por ejemplo la asignación de impuestos, con medidas combinadas con el comercio de éstas. De todos los estudios de caso se concluye que la mejor opción para cualquier medida de mitigación es combinarla con el comercio internacional de emisiones de carbono.

Para el caso de Japón⁴⁸ se propone el uso de un “impuesto de cambio climático” dirigida a la reducción de emisiones de CO₂ a un nivel acordado en el Protocolo de Kioto. Se asume que los ingresos obtenidos por el impuesto serán destinados a la compra de equipo eficiente de energía. Esta medida implica la restricción en el comercio internacional de emisiones con implicaciones económicas considerables. El objetivo planteado sólo puede ser alcanzado si se logra una mejora en la intensidad energética a la planteada por el modelo EPPA, lo cual supone un aumento del 2% anual. Esta condición significa alcanzar tasas mayores a las presentadas en el periodo de los 70's y 80's. El modelo demostró que esta política no es viable para la reducción de emisiones a menos de que se introduzcan subsidios para la mejora de intensidad energética. Los mejores resultados se obtienen del comercio de emisiones. Se calculó que el comercio arrojaría una reducción en el precio del carbono; una pérdida de bienestar 6 veces menor al caso de sólo impuesto, y una mejora considerable en el contenido de carbón de sus exportaciones.

En el caso de la India⁴⁹, el análisis se enfoca en los problemas que genera la implementación de diferentes enfoques basados en incentivos, por ejemplo el impuesto al carbono, y con los instrumentos de mercado, en particular los relacionados con el monitoreo de emisiones y su aplicación. El estudio concluyó que la adopción de las medidas no puede ser considerada individualmente. Para lograr una medida efectiva en la reducción de emisiones tiene que adoptarse una medida más amplia en el que se combinen los enfoques basados en incentivos y los instrumentos de mercado.

Para el caso de los países de la Unión Europea⁵⁰, se asumió que el objetivo del grupo de 9 países es la reducción del 8% por debajo de los niveles presentados en 1990. En el análisis se compara el costo para cada país si establecen individualmente un objetivo en reducción de emisiones aplicando un sistema interno de cap and trade sin comercio entre los países. Se toman en cuenta las variables de crecimiento económico, precio de la energía, el desarrollo del sector eléctrico y la trayectoria de una línea base de emisiones de CO₂ en el caso de no realizar cambios en regulación energética y ambiental. Se asumen tasas de crecimiento de entre 2.5 y 2.9% hasta 2020. Los precios de la energía aumentan gradualmente y cuanto a la generación de energía se supone que se mantiene prácticamente igual hasta el 2020. En cuanto a las emisiones, la tasa de crecimiento es de 1.07% por año de 1995 a 2010 y de 2010 a 2020 que es de 0.64%. Los resultados del estudio se reflejan en curvas marginales de abatimiento. La variación en las diferentes curvas indica un potencial para el comercio de emisiones dentro de la Unión Europea, lo cual ayudaría a la reducción de costos en el cumplimiento del Protocolo de Kioto. Sin el comercio de emisiones, se calculó que el costo en pérdida de bienestar varíe de 0.6% a 5%.

⁴⁸ Kasahara, S., S. Paltsev, J. Reilly, H. Jacoby and A.D. Ellerman, *Climate Change Taxes and Energy Efficiency in Japan*, Joint Program Report Series (May 2005)

⁴⁹ Gupta, S., *Incentive-based Approaches for Mitigating Greenhouse Gas Emissions: Issues and Prospects for India*, Joint Program Report Series (June 2002)

⁵⁰ Viguier, L.L., M.H. Babiker and J.M. Reilly, *Carbon Emissions and The Kyoto Commitment in the European Union*, Joint Program Report Series (February 2001)

8. ANEXOS

- **Report 181.**
Development of a Fast and Detailed Model of Urban-Scale Chemical and Physical Processing
- **Report 180.**
Analysis of Climate Policy Targets under Uncertainty
- **Report 179.**
Assessing Evapotranspiration Estimates from the Global Soil Wetness Project Phase 2 (GSWP-2) Simulations
- **Report 178.**
Measuring Welfare Loss Caused by Air Pollution in Europe: A CGE Analysis
- **Report 177.**
Global Health and Economic Impacts of Future Ozone Pollution
- **Report 176.**
Biofuels, Climate Policy and the European Vehicle Fleet
- **Report 175.**
Potential Climatic Impacts and Reliability of Very Large-Scale Wind Farms
- **Report 174.**
A semi-empirical representation of the temporal variation of total greenhouse gas levels expressed as equivalent levels of carbon dioxide
- **Report 173.**
The Cost of Climate Policy in the United States; Appendix B: Measuring the Cost of Climate Policy; Appendix C: Cost of Climate Policy and the Waxman-Markey American Clean Energy and Security Act of 2009 (H.R. 2454)
- **Report 172.**
Prospects for Plug-in Hybrid Electric Vehicles in the United States and Japan: A General Equilibrium Analysis
- **Report 171.**
Designing a U.S. Market for CO₂
- **Report 170.**
The EU's Emissions Trading Scheme: A prototype global system?
- **Report 169.**
Probabilistic Forecast for 21st Century Climate Based on Uncertainties in Emissions (without Policy) and Climate Parameters
- **Report 168.**
Unintended Environmental Consequences of a Global Biofuels Program)
- **Report 167.**
Sharing the Burden of GHG Reductions

- **Report 166.**
Sensitivity of Climate Change Projections to Uncertainties in the Estimates of Observed Changes in Deep-Ocean Heat Content
- **Report 165.**
Uncertainty in Greenhouse Emissions and Costs of Atmospheric Stabilization
- **Report 164.**
Marginal Abatement Costs and Marginal Welfare Costs for Greenhouse Gas Emissions Reductions: Results from the EPPA Model
- **Report 163.**
The Influence on Climate Change of Differing Scenarios for Future Development Analyzed Using the MIT Integrated Global System Model
- **Report 162.**
The European Carbon Market in Action: Lessons from the First Trading Period Interim Report
- **Report 161.**
A Forward Looking Version of the MIT Emissions Prediction and Policy Analysis (EPPA) Model
- **Report 160.**
Analysis of U.S. Greenhouse Gas Tax Proposals
- **Report 159.**
Impact of sulfur and carbonaceous emissions from international shipping on aerosol distributions and direct radiative forcing
- **Report 158.**
Analysis of the Coal Sector Under Carbon Constraints
- **Report 157.**
Constraining Climate Model Parameters from Observed 20th Century Changes
- **Report 156.**
Estimating the Economic Cost of Sea-Level Rise
- **Report 155.**
Potential Land Use Implications of a Global Biofuels Industry
- **Report 154.**
Modeling the Prospects for Hydrogen Powered Transportation Through 2100
- **Report 153.**
Climate change, mortality, and adaptation: Evidence from annual fluctuations in weather in the U.S.
- **Report 152.**
Energy Scenarios for East Asia: 2005-2025
- **Report 151.**
Consequences of considering carbon–nitrogen interactions on the feedbacks between climate and the terrestrial carbon cycle

- **Report 150.**
U.S. Greenhouse Gas Cap-and-Trade Proposals: Application of a Forward-Looking Computable General Equilibrium Model
- **Report 149.**
Global economic effects of changes in crops, pasture, and forests due to changing climate, carbon dioxide, and ozone
- **Report 148.**
Relative roles of climate sensitivity and forcing in defining the ocean circulation response to climate change
- **Report 147.**
A Global Land System Framework for Integrated Climate-Change Assessments
- **Report 146.**
Assessment of U.S. Cap-and-Trade Proposals
- **Report 145.**
Biomass Energy and Competition for Land
- **Report 144.**
Heavier Crude, Changing Demand for Petroleum Fuels, Regional Climate Policy, and the Location of Upgrading Capacity: A Preliminary Look
- **Report 143.**
Technical Change, Investment and Energy Intensity
- **Report 142.**
Federal Tax Policy Towards Energy
- **Report 141.**
Over-allocation or abatement: A preliminary analysis of the EU Emissions Trading Scheme based on the 2005 emissions data
- **Report 140.**
The Allocation of European Union Allowances: Lessons, Unifying Themes and General Principles
- **Report 139.**
Directed Technical Change and the Adoption of CO₂ Abatement Technology: The Case of CO₂ Capture and Storage
- **Report 138.**
Energy Conservation in the United States: Understanding its Role in Climate Policy
- **Report 137.**
Unemployment Effects of Climate Policy
- **Report 136.**
Bringing Transportation into a Cap-and-Trade Regime
- **Report 135.**
Modeling Climate Feedbacks to Energy Demand: The Case of China
- **Report 134.**
Directed Technical Change and Climate Policy

- **Report 133.**
Estimating Probability Distributions from Complex Models with Bifurcations: The Case of Ocean Circulation Collapse
- **Report 132.**
The Value of Emissions Trading
- **Report 131.**
The Economic Impacts of Climate Change: Evidence from Agricultural Profits and Random Fluctuations in Weather
- **Report 130.**
Absolute vs. Intensity Limits for CO2 Emission Control: Performance Under Uncertainty
- **Report 129.**
Future Carbon Regulations and Current Investments in Alternative Coal-Fired Power Plant Designs
- **Report 128.**
Evaluating the Use of Ocean Models of Different Complexity in Climate Change Studies
- **Report 127.**
An Analysis of the European Emission Trading Scheme
- **Report 126.**
Estimated PDFs of Climate System Properties Including Natural and Anthropogenic Forcings
- **Report 125.**
The MIT Emissions Prediction and Policy Analysis (EPPA) Model: Version 4
- **Report 124.**
The MIT Integrated Global System Model (IGSM) Version 2: Model Description and Baseline Evaluation
- **Report 123.**
Simulating the Spatial Distribution of Population and Emissions to 2100
- **Report 122.**
A Three-Dimensional Ocean-Seaice-Carbon Cycle Model and its Coupling to a Two-Dimensional Atmospheric Model: Uses in Climate Change Studies
- **Report 121.**
Climate Change Taxes and Energy Efficiency in Japan
- **Report 120.**
What Should the Government Do to Encourage Technical Change in the Energy Sector?
- **Report 119.**
Does Model Sensitivity to Changes in CO2 Provide a Measure of Sensitivity to the Forcing of Different Nature?
- **Report 118.**
Effects of Air Pollution Control on Climate

- **Report 117.**
Modeling the Transport Sector: The Role of Existing Fuel Taxes in Climate Policy
- **Report 116.**
Explaining Long-Run Changes in the Energy Intensity of the U.S. Economy
- **Report 115.**
Future United States Energy Security Concerns
- **Report 114.**
The Role of Non-CO2 GHGs in Climate Policy: Analysis Using the MIT IGSM
- **Report 113.**
Economic Benefits of Air Pollution Regulation in the USA: An Integrated Approach
- **Report 112.**
The Cost of Kyoto Protocol Targets: The Case of Japan
- **Report 111.**
Technology and Technical Change in the MIT EPPA Model
- **Report 110.**
Stabilization and Global Climate Policy
- **Report 109.**
Sensitivity of Climate to Diapycnal Diffusivity in the Ocean. Part I: Equilibrium State. Part II: Global Warming Scenario
- **Report 108.**
Methane Fluxes Between Terrestrial Ecosystems and the Atmosphere at Northern High Latitudes During the Past Century: A Retrospective Analysis with a Process-based Biogeochemistry Model
- **Report 107.**
Informing Climate Policy Given Incommensurable Benefits Estimates
- **Report 106.**
Climate Prediction: The Limits of Ocean Models
- **Report 105.**
Analysis of Strategies of Companies Under Carbon Constraint: Relationship Between Profit Structure of Companies and Carbon/Fuel Price Uncertainty
- **Report 104.**
A Process-based Analysis of Methane Exchanges Between Alaskan Terrestrial Ecosystems and the Atmosphere
- **Report 103.**
Past and Future Effects of Ozone on Net Primary Production and Carbon Sequestration Using a Global Biogeochemical Model
- **Report 102.**
Induced Technical Change and the Cost of Climate Policy
- **Report 101.**
Technology Detail in a Multi-Sector CGE Model: Transport Under Climate Policy

- **Report 100.**
Absolute vs. Intensity-Based Emission Caps
- **Report 99.**
Thermohaline Circulation Stability: A Box Model Study. Part I: Uncoupled Model.
Part II: Coupled Atmosphere-Ocean Model
- **Report 98.**
Russia's Role in The Kyoto Protocol
- **Report 97.**
Emissions Trading to Reduce Greenhouse Gas Emissions in the United States:
The McCain-Lieberman Proposal
- **Report 96.**
Market Power in International Carbon Emissions Trading: A Laboratory Test
- **Report 95.**
Uncertainty Analysis of Climate Change and Policy Response
- **Report 94.**
Modeling Non-CO2 Greenhouse Gas Abatement
- **Report 93.**
Is International Emissions Trading Always Beneficial?
- **Report 92.**
An Issue of Permanence: Assessing the Effectiveness of Temporary Carbon
Storage
- **Report 91.**
Exclusionary Manipulation of Carbon Permit Markets: A Laboratory Test
- **Report 90.**
Ozone Effects on Net Primary Production and Carbon Sequestration in the
Conterminous United States Using a Biogeochemistry Model
- **Report 89.**
Representing Energy Technologies in Top-down Economic Models Using Bottom-
up Information
- **Report 88.**
The Deep-Ocean Heat Uptake in Transient Climate Change
- **Report 87.**
Sensitivities of Deep-Ocean Heat Uptake and Heat Content to Surface Fluxes and
Subgrid-scale Parameters in an Ocean GCM with Idealized Geometry
- **Report 86.**
Incentive-based Approaches for Mitigating Greenhouse Gas Emissions: Issues and
Prospects for India
- **Report 85.**
Tax Distortions and Global Climate Policy
- **Report 84.**
A Modeling Study on the Climate Impacts of Black Carbon Aerosols

- **Report 83.**
The "Safety Valve" and Climate Policy
- **Report 82.**
The Evolution of a Climate Regime: Kyoto to Marrakech
- **Report 81.**
A Comparison of the Behavior of Different AOGCMs in Transient Climate Change Experiments
- **Report 80.**
Uncertainty in Atmospheric CO₂ Predictions from a Parametric Uncertainty Analysis of a Global Ocean Carbon Cycle Model
- **Report 79.**
Uncertainty in Emissions Projections for Climate Models
- **Report 78.**
Quantifying Uncertainties in Climate System Properties using Recent Climate Observations
- **Report 77.**
Comparing Greenhouse Gases
- **Report 76.**
CO₂ Abatement by Multi-fueled Electric Utilities: An Analysis Based on Japanese Data
- **Report 75.**
Feedbacks Affecting the Response of the Thermohaline Circulation to Increasing CO₂. A Study with a Model of Intermediate Complexity
- **Report 74.**
The Welfare Costs of Hybrid Carbon Policies in the European Union
- **Report 73.**
Uncertainty Analysis of Global Climate Change Projections
- **Report 72.**
Cap and Trade Policies in the Presence of Monopoly and Distortionary Taxation
- **Report 71.**
The MIT Emissions Prediction and Policy Analysis (EPPA) Model: Revisions, Sensitivities, and Comparisons of Results
- **Report 70.**
Carbon Emissions and The Kyoto Commitment in the European Union
- **Report 69.**
Tradable Permits for Greenhouse Gas Emissions: A primer with particular reference to Europe
- **Report 68.**
How to Think About Human Influence on Climate
- **Report 67.**
The Curious Role of "Learning" in Climate Policy: Should We Wait for More Data?

- **Report 66.**
Fair Trade and Harmonization of Climate Change Policies in Europe
- **Report 65.**
Rethinking the Kyoto Emissions Targets
- **Report 64.**
The Effects of Changing Consumption Patterns on the Costs of Emission Restrictions
- **Report 63.**
Linking Local Air Pollution to Global Chemistry and Climate
- **Report 62.**
Constraining Climate Model Properties Using Optimal Fingerprint Detection Methods
- **Report 61.**
Effects of Differentiating Climate Policy by Sector: A U.S. Example
- **Report 60.**
A Coupled Atmosphere-Ocean Model of Intermediate Complexity for Climate Change Study
- **Report 59.**
Supplementarity: An Invitation To Monopsony?
- **Report 58.**
Multiple Gas Control Under the Kyoto Agreement
- **Report 57.**
A Game of Climate Chicken: Can EPA Regulate Greenhouse Gases Before the U.S. Senate Ratifies the Kyoto Protocol?
- **Report 56.**
The Kyoto Protocol and Developing Countries
- **Report 55.**
Changes in Sea-Level associated with Modifications of the Mass Balance of the Greenland and Antarctic Ice Sheets over the 21st Century
- **Report 54.**
Model Estimates of the Mass Balance of the Greenland & Antarctic Ice Sheets
- **Report 53.**
Developing Country Effects of Kyoto-Type Emissions Restrictions
- **Report 52.**
Interactive Chemistry and Climate Models in Global Change Studies
- **Report 51.**
Japanese Nuclear Power and the Kyoto Agreement
- **Report 50.**
A Study of the Effects of Natural Fertility, Weather and Productive Inputs in Chinese Agriculture

- **Report 49.**
Toward a Useful Architecture for Climate Change Negotiations
- **Report 48.**
Adjusting to Policy Expectations in Climate Change Modeling: An Interdisciplinary Study of Flux Adjustments in Coupled Atmosphere-Ocean General Circulation Models
- **Report 47.**
Constraining Uncertainties in Climate Models Using Climate Change Detection Methods
- **Report 46.**
From Science to Policy: The Science-Related Politics of Climate Change Policy in the U.S.
- **Report 45.**
Multi-Gas Assessment of the Kyoto Protocol
- **Report 44.**
Primary Aluminum Production: Climate Policy, Emissions and Costs
- **Report 43.**
The Uses and Misuses of Technology Development as a Component of Climate Policy
- **Report 42.**
Obstacles To Global CO₂ Trading: A Familiar Problem
- **Report 41.**
The Effects on Developing Countries of the Kyoto Protocol and CO₂ Emissions Trading
- **Report 40.**
Analysis of Post-Kyoto CO₂ Emissions Trading Using Marginal Abatement Curves
- **Report 39.**
Uncertainty in Atmospheric CO₂ Concentrations from a Parametric Uncertainty Analysis of a Global Ocean Carbon Cycle Model
- **Report 38.**
Sequential Climate Decisions Under Uncertainty: An Integrated Framework
- **Report 37.**
Quantifying the Uncertainty in Climate Predictions
- **Report 36.**
Integrated Global System Model for Climate Policy Assessment: Feedbacks and Sensitivity Studies
- **Report 35.**
Impact of Emissions, Chemistry, and Climate on Atmospheric Carbon Monoxide: 100-year Predictions from a Global Chemistry-Climate Model
- **Report 34.**
Combined Effects of Anthropogenic Emissions and Resultant Climatic Changes on Atmospheric OH

- **Report 33.**
Economic Development and the Structure of the Demand for Commercial Energy
- **Report 32.**
Kyoto's Unfinished Business
- **Report 31.**
Beyond Emissions Paths: Rethinking the Climate Impacts of Emissions Protocols in an Uncertain World
- **Report 30.**
Uncertainty in Future Carbon Emissions: A Preliminary Exploration
- **Report 29.**
Analysis of CO₂ Emissions from Fossil Fuel in Korea: 1961-1994
- **Report 28.**
Transient Climate Change and Net Ecosystem Production of the Terrestrial Biosphere
- **Report 27.**
Annex I Differentiation Proposals: Implications for Welfare, Equity and Policy
- **Report 26.**
Necessary Conditions for Stabilization Agreements
- **Report 25.**
Interactions Among Emissions, Atmospheric Chemistry, and Climate Change: Implications for Future Trends
- **Report 24.**
A Global Interactive Chemistry and Climate Model
- **Report 23.**
Uncertainty in the Oceanic Heat and Carbon Uptake and their Impact on Climate Projections
- **Report 22.**
Same Science, Differing Policies; The Saga of Global Climate Change
- **Report 21.**
Needed: A realistic strategy for global warming
- **Report 20.**
Parameterization of Urban Sub-grid Scale Processes in Global Atmospheric Chemistry Models
- **Report 19.**
Joint Implementation: Lessons from Title IV's Voluntary Compliance Programs
- **Report 18.**
Transient Climate Change and Potential Croplands of the World in the 21st Century
- **Report 17.**
A Flexible Climate Model for Use in Integrated Assessments
- **Report 16.**
What Drives Deforestation in the Brazilian Amazon?

- **Report 15.**
Economic Assessment of CO₂ Capture and Disposal
- **Report 14.**
What Does Stabilizing Greenhouse Gas Concentrations Mean?
- **Report 13.**
Greenhouse Policy Architectures and Institutions
- **Report 12.**
Net Primary Production of Terrestrial Primary Production in China and its
Equilibrium Responses to Changes in Climate and Atmospheric CO₂
Concentration
- **Report 11.**
Global Warming Projections: Sensitivity to Deep Ocean Mixing
- **Report 10.**
Modeling the Emissions of Nitrous Oxide (N₂O) and Methane (CH₄) from the
Terrestrial Biosphere to the Atmosphere
- **Report 9.**
CO₂ Emissions Limits: Economic Adjustments and the Distribution of Burdens
- **Report 8.**
Relative Roles of Changes in CO₂ and Climate to Equilibrium Responses of Net
Primary Production and Carbon Storage of the Terrestrial Biosphere
- **Report 7.**
Integrated Global System Model for Climate Policy Analysis: I. Model Framework
and Sensitivity Studies
- **Report 6.**
The MIT Emissions Prediction and Policy Analysis (EPPA) Model
- **Report 5.**
World Energy Consumption and Carbon Dioxide Emissions:1950-2050
- **Report 4.**
Application of Probabilistic Collocation Method for Uncertainty Analysis of a Simple
Ocean Model
- **Report 3.**
Responses of Primary Production and Total Carbon Storage to Changes in Climate
and Atmospheric CO₂ Concentration
- **Report 2.**
Description and Validation of the MIT Version of the GISS 2-D Model
- **Report 1.**
Uncertainty in Climate Change Policy Analysis

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Babiker, M., and R.S. Eckaus, *Unemployment Effects of Climate Policy*, Joint Program Report Series (July 2006)
2. Babiker, M., M.E. Bautista, H.D. Jacoby and J.M. Reilly, *Effects of Differentiating Climate Policy by Sector: A U.S. Example*, Joint Program Report Series (May 2000)
3. Barker T., I. Bashmakov, L. Bernstein, J. E. Bogner, P. R. Bosch, R. Dave, O. R. Davidson, B. S. Fisher, S. Gupta, K. Halsnæs, G.J. Heij, S.Kahn Ribeiro, S. Kobayashi, M. D. Levine, D. L. Martino, O. Masera, B. Metz, L. A. Meyer, G.-J. Nabuurs, A. Najam, N. Nakicenovic, H. -H. Rogner, J. Roy, J. Sathaye, R. Schock, P. Shukla, R. E. H. Sims, P. Smith, D. A. Tirpak, D. Urge-Vorsatz, D. Zhou, 2007b: Resumen Técnico. En Cambio Climático 2007: Mitigación. Contribución del Grupo de Trabajo III al Cuarto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático [B. Metz, O. R. Davidson, P. R. Bosch, R. Dave, L. A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.
4. Barker, T., I. Bashmakov, A. Alharthi, M. Amann, L. Cifuentes, J. Drexhage, M. Duan, O. Edenhofer, B. Flannery, M. Grubb, M. Hoogwijk, F. I. Ibitoye, C. J. Jepsma, W.A. Pizer, K. Yamaji, 2007: Mitigation from a cross-sectoral perspective. In Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [B. Metz, O.R.Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
5. Claussen, M., 2000: Earth system models. In: Ehlers, E. & Krafft, T. (Ed.) 2000: "Understanding the Earth System: Compartments, Processes and Interactions", Springer-Verlag Heidelberg.
6. CMIP3 (2007), "Climate Model Documentation", consultado en http://www-pcmdi.llnl.gov/ipcc/model_documentation/ipcc_model_documentation.php
7. Collins, W.D., et al., 2006, "Radiative forcing by well-mixed greenhouse gases: Estimates from climate models in the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Fourth Assessment Report (AR4)", *J. Geophys. Res.*, 111, D14317, doi:10.1029/2005JD006713.
8. De Vries Bert J.M., Detlef P. van Vuuren, Michel G.J. den Elzen and Marco A. Janssen,
9. Edenhofer Ottmar, Kai Lessmann, Claudia Kemfert, Michael Grubb and Jonathan Köhler. Induced Technological Change: Exploring its Implications for the Economics of Atmospheric Stabilization: Synthesis Report from the Innovation Modeling Comparison Project. Special Issue of the Energy Journal. International Association for Energy Economics, IAEE, 2006
10. Ellerman, A.D., H.D. Jacoby and M.B. Zimmerman. *Bringing Transportation into a Cap-and-Trade Regime*, Joint Program Report Series (June 2006)
11. Fisher, B.S., N. Nakicenovic, K. Alfsen, J. Corfee Morlot, F. de la Chesnaye, J.-Ch. Hourcade, K. Jiang, M. Kainuma, E. La Rovere, A. Matysek, A. Rana, K. Riahi, R. Richels, S. Rose, D. van Vuuren, R. Warren, 2007: Issues related to mitigation in the long term context, In Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Inter-governmental Panel on Climate Change [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
12. Flato G. M., and G. J. Boer, 2001, "Warming asymmetry in climate change simulations", *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 195–198.
13. Flato, G.M., and Participating CMIP Modeling Groups, 2004, "Sea-ice and its response to CO₂ forcing as simulated by global climate change studies", *Climate Dynamics.*, 23, 220–241.

14. GFDL GAMDT (The GFDL Global Model Development Team), 2004, "The new GFDL global atmospheric and land model AM2-LM2: Evaluation with prescribed SST simulations", *J. Climate* 17:4641-4673.
15. Gitiaux, X., S. Paltsev, J. Reilly and S. Rausch, *Biofuels, Climate Policy and the European Vehicle Fleet*. Joint Program Report Series, 2009
16. Gordon et al., 2000, "The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments", *Climate Dynamics* 16:147-168.
17. Gupta, S., *Incentive-based Approaches for Mitigating Greenhouse Gas Emissions: Issues and Prospects for India*, Joint Program Report Series (June 2002)
18. Gurgel, A., J. Reilly & S. Paltsev, *Potential Land Use Implications of a Global Biofuels Industry*, Joint Program Report Series (March 2008)
19. Gurgel, A., S. Paltsev, J. Reilly and G. Metcalf, 2007, "U.S. Greenhouse Gas Cap-and-Trade Proposals: Application of a Forward-Looking Computable General Equilibrium Model", Report 150, Joint Program Report Series (June 2007).
20. Gurgel, A., S. Paltsev, J. Reilly and G. Metcalf, *U.S. Greenhouse Gas Cap-and-Trade Proposals: Application of a Forward-Looking Computable General Equilibrium Model*, Joint Program Report Series (June 2007)
21. Integrated Model to Assess the Greenhouse Effect (IMAGE) from the National Institute for Public Health and Environmental Hygiene (RIVM) (Alcamo et al., 1998; de Vries et al., 1994, 1999, 2000), used in connection with the Dutch Bureau for Economic Policy Analysis (CPB) WorldScan model (de Jong and Zalm, 1991), the Netherlands
22. IPCC (1997), An introduction to Simple Climate Models used in the IPCC Second Assessment Report, IPCC Technical Paper II. IPCC.
23. IPCC (2007), Global Climate Projections. *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Participating authors: Meehl, G.A., T.F. Stocker, W.D. Collins, P. Friedlingstein, A.T. Gaye, J.M. Gregory, A. Kitoh, R. Knutti, J.M. Murphy, A. Noda, S.C.B. Raper, I.G. Watterson, A.J. Weaver and Z.-C. Zhao* Climate Change 2007: The Physical Science Basis. [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
24. IPCC Special Report on Emissions Scenarios, Appendix IV: Six Modeling Approaches. http://www.grida.no/publications/other/ipcc_sr/?src=/climate/ipcc/emission/index.htm
25. Jacoby, Henry D. Mustafa H. Babiker, Sergey Paltsev, and John M. Reilly, *Sharing the Burden of GHG Reductions*. Joint Program Report Series (November 2008)
26. Kasahara, S., S. Paltsev, J. Reilly, H. Jacoby and A.D. Ellerman, *Climate Change Taxes and Energy Efficiency in Japan*, Joint Program Report Series (May 2005)
27. Lacy, Rodolfo. *Towards a North American Carbon Market Transportation Sector*. Centro Mario Molina, Presentación Agosto 2009
28. Lashof and Tirpak Pepper et al, Atmospheric Stabilization Framework Model (ASF), ICF Consulting in the USA, 1990.
29. McFarland James R., John Reilly and Howard J. Herzog. *Representing Energy Technologies in Top-down Economic Models Using Bottom-up Information*, Joint Program Report Series (October 2002)

30. Melillo, J.M., A.C. Gurgel, D.W. Kicklighter, J.M. Reilly, T.W. Cronin, B.S. Felzer, S. Paltsev, C.A. Schlosser, A.P. Sokolov and X. Wang. *Unintended Environmental Consequences of a Global Biofuels Program*, Joint Program Report Series (January 2009)
31. Metcalf, G.E., S. Paltsev, J. M. Reilly, H.D. Jacoby & J. Holak, Analysis of U.S. Greenhouse Gas Tax Proposals, Joint Program Report Series (April 2008)
32. Mini Climate Assessment Model (MiniCAM) from the Pacific Northwest National Laboratory (PNNL) in the USA (Edmonds et al., 1994, 1996a, 1996b)
33. MIT, 2009, The MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change, consultado en <http://globalchange.mit.edu/index.html>
34. Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact (MESSAGE) from the International Institute of Applied Systems Analysis (IIASA) in Austria (Messner and Strubegger, 1995; Riahi and Roehrl, 2000)
35. Morita et al., Asian Pacific Integrated Model (AIM) from the National Institute of Environmental Studies in Japan (1994)
36. Morris, J., S. Paltsev and J. Reilly. *Marginal Abatement Costs and Marginal Welfare Costs for Greenhouse Gas Emissions Reductions: Results from the EPPA Model*. Joint Program Report Series, MIT, USA, 2008.
37. Multiregional Approach for Resource and Industry Allocation (MARIA) from the Science University of Tokyo in Japan (Mori and Takahashi, 1999; Mori, 2000)
38. Nakicenovic, N., J. Alcamo, G. Davis, B. de Vries, J. Fenham, S. Gaffin, K. Gregory, A. Grübler, T.-Y. Jung, T. Kram, E.L. La Rovere, L. Michaelis, S. Mori, T. Morita, W. Pepper, H. Pitcher, L. Price, K. Riahi, A. Reohrl, H.H. Rogner, A. Sankovski, M. Schlesinger, P. Shukla, S. Smith, R. Swart, S. van Rooijen, N. Victor, and Z. Dadi, 2000: Special report on emissions scenarios. Working Group III, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge, 595 pp.
39. Nordhaus, William. Modelos DICE y RICE. Véase: <http://nordhaus.econ.yale.edu/>
40. Paltsev, S., J.M. Reilly, H.D. Jacoby and J.F. Morris. *The Cost of Climate Policy in the United States*, Joint Program Report Series (Sept. 2009)
41. Paltsev, S., J.M. Reilly, H.D. Jacoby, R.S. Eckaus, J. McFarland, M. Sarofim, M. Asadoorian and M. Babiker, 2005, "The MIT Emissions Prediction and Policy Analysis (EPPA) Model: Version 4", Report 125, Joint Program Report Series (August 2005).
42. Parsons, J.E., A.D. Ellerman and S. Feilhaber, *Designing a U.S. Market for CO₂*, Joint Program Report Series (February 2009)
43. Pope et al., 2000, "The impact of new physical parameterizations in the Hadley Centre climate model: HadAM3", *Climate Dynamics* 16:123-146.
44. Prinn Ronald, John Reilly, Marcus Sarofim, Chien Wang and Benjamin Felzer. *Effects of Air Pollution Control on Climate*
45. Prinn, R.G., H.D. Jacoby, A.P. Sokolov, C. Wang, X. Xiao, Z. Yang, R.S. Eckaus, P.H. Stone, A.D. Ellerman, J.M. Melillo, J. Fitzmaurice, D. Kicklighter, G. Holian and Y. Liu, 1999, "Integrated global system model (IGSM) for climate policy assessment: Feedbacks and sensitivity studies", *Climatic Change*, 41(3): 469-549.
46. Randel, D.A., et al., 2007, "Climate models and their evaluation", *Climate Change 2007: The Physical Basis*. (Solomon et al., eds.) Cambridge University Press:Cambridge. pp. 589-662.
47. Reilly John Sergey Paltsev and Frederic Choumert. *Heavier Crude, Changing Demand for Petroleum Fuels, Regional Climate Policy, and the Location of Upgrading Capacity: A Preliminary Look*. Joint Program Report Series, MIT, USA, 2007.

48. Reilly, J., and S. Paltsev, *Biomass Energy and Competition for Land*, Joint Program Report Series (April 2007)
49. Richard Moss, Mustafa Babiker, Sander Brinkman, Eduardo Calvo, Tim Carter, Jae Edmonds, Ismail Elgizouli, Seita Emori, Lin Erda, Kathy Hibbard, Roger Jones, Mikiko Kainuma, Jessica Kelleher, Jean Francois Lamarque, Martin Manning, Ben Matthews, Jerry Meehl, Leo Meyer, John Mitchell, Nebojsa Nakicenovic, Brian O'Neill, Ramon Pichs, Keywan Riahi, Steven Rose, Paul Runci, Ron Stouffer, Detlef van Vuuren, John Weyant, Tom Wilbanks, Jean Pascal van Ypersele, and Monika Zurek, 2008. *Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies*. Technical Summary. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, 25 pp.
50. Schafer, A., and H.D. Jacoby. *Technology Detail in a Multi-Sector CGE Model: Transport Under Climate Policy*, Joint Program Report Series. (July 2003)
51. Schlosser, C.A., D. Kicklighter and A. Sokolov, 2007, "A Global Land System Framework for Integrated Climate-Change Assessments", Report 147, Joint Program Report Series (May 2007).
52. Selin, N.E., S. Wu, K.-M. Nam, J.M. Reilly, S. Paltsev, R.G. Prinn and M.D. Webster. *Global Health and Economic Impacts of Future Ozone Pollution*, Joint Program Report Series (August 2009)
53. Sue Wing, Ian et al. The synthesis of bottom-up and top-down approaches to climate policy modeling: electric power technologies and the cost of limiting US CO₂ emissions. *Energy Policy* 34 (2006) 3847–3869
54. The American Clean Energy and Security Act of 2009, <http://www.opencongress.org/bill/111-h2454/show>
55. The Targets IMAGE Energy Regional (TIMER) Model. Technical Documentation RIVM report 461502024 2001.
56. Viguier, L.L., M.H. Babiker and J.M. Reilly, Carbon Emissions and The Kyoto Commitment in the European Union, Joint Program Report Series (February 2001)
57. Wang, C., and R. Prinn. *Climatic Impacts and Reliability of Very Large-Scale Wind Farms*. Joint Program Report Series Potential (June 2009)
58. Weyant, J.P., De la Chesnaye, F.C., Blanford, G. Overview of EMF-21: multigas mitigation and climate policy (2006) *Energy Journal*, (SPEC. ISSUE), pp. 1-32.
59. Wigley and Raper, MAGICC/SCENGEN <http://www.cgd.ucar.edu/cas/wigley/magicc/>



Centro Mario Molina para Estudios Estratégicos Sobre Energía y Medio Ambiente A.C.

Paseo de los Laureles No 458 Int. 406

Col. Bosques de las Lomas 05120

México, D.F.

T: (+55) 9177.1670

F: (+55) 9177.1670 ext 114

www.centromariomolina.org

