

**NACIONES UNIDAS
COMISIÓN ECONÓMICA
PARA AMÉRICA LATINA
Y EL CARIBE – CEPAL**



Distr.
LIMITADA

17 de abril de 2008

ORIGINAL: ESPAÑOL

**UNA INTRODUCCION A LOS MODELOS INTEGRADOS DE
VALORACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO**

LEONOR TURTÓS CARBONELL

Este documento fue preparado por Leonor Turtós Carbonell, consultora de la Unidad de Energía y Recursos Naturales de la Sede Subregional de la CEPAL en México. La autora agradece los aportes sustantivos que dieron al informe Elieza Meneses Ruiz y Madeleine Sánchez, así como la revisión de José de Jesús Rivero Oliva, del Grupo de Impacto Ambiental de la División de Energía de CUBAENERGÍA. La autora también agradece los comentarios de Fernando Cuevas Moreno, Jefe de la Unidad de Energía y Recursos Naturales, durante la elaboración de la versión final de este documento.

Las opiniones expresadas en este informe, que no ha sido sometido a revisión editorial, son de exclusiva responsabilidad de la autora y pueden no coincidir con las de la Organización.

ÍNDICE

	<u>Página</u>
RESUMEN	1
1. INTRODUCCIÓN.....	3
2. MODELOS INTEGRADOS DE VALORACIÓN.....	5
2.1 Externalidades	5
2.2 Generalidades de los modelos: premisas y resultados generales	6
2.3 Agregación de los resultados.....	9
2.4. Adaptación.....	10
3. PAGE2002	11
3.1 Especificación regional	11
3.2 Especificación temporal	12
3.3 Contaminantes considerados	13
3.4 Características del modelo.....	13
3.5 Datos de entrada	14
3.5.1 Datos del año base.....	14
3.5.2 Tasas de crecimiento	14
3.5.3 Otros parámetros	14
3.5.4 Parámetro con incertidumbre	14
3.6 Metodología.....	15
3.6.1 Cálculo de emisiones.....	15
3.6.2 Forzamiento radiactivo	18
3.6.3 Temperatura	20
3.6.4 Parámetros de impacto	20
3.6.4.1 Parámetro de Impacto de la discontinuidad	21
3.6.5 Estimación del daño	22
3.6.6 Costos de adaptación.....	24
3.6.7 Costos de adaptación preventiva.....	24
3.7 Incertidumbres	26
3.8 Salidas del Modelo PAGE2002.....	26
4. RICE	28
4.1 Especificación regional	28
4.2 Especificación temporal	29
4.3 Contaminantes	29

4.4	Metodología.....	29
4.4.1	Descripción general.....	29
4.4.2	Ecuaciones fundamentales	31
4.4.3	Valoración de impactos.....	35
4.4.3.1	Agricultura	36
4.4.3.2	Otros sectores de mercado	37
4.4.3.3	Regiones costeras.....	37
4.4.3.4	Impactos al confort no incluidos en el mercado ...	37
4.4.3.5	Salud	37
4.4.3.6	Asentamientos humanos y ecosistemas	37
4.4.3.7	Catástrofes.....	37
4.4.4	Función de daño	37
4.5	Variables en el modelo	38
4.5.1	Variables y parámetros exógenos	38
4.5.2	Calibración de las variables y parámetros exógenos	38
4.5.2.1	Datos básicos del año de referencia.....	38
4.5.2.2	Parámetros de tendencia exógenos	40
4.5.3	Variables endógenas y costos estimados claves	41
4.6	Análisis de políticas.....	42
4.7	Método de solución general	43
4.8	Salidas del RICE.....	43
4.9	Comparación entre las implementaciones de RICE en Excel y GAMS.....	44
5.	FUND	46
5.1	Regiones	46
5.2	Especificación temporal	47
5.3	Contaminantes	47
5.4	Concepción general	47
5.5	Datos de entrada	48
5.5.1	Datos de población.....	48
5.5.2	Datos económicos	48
5.5.3	Datos tecnológicos	48
5.5.4	Datos de emisiones exógenas y adicionales.....	49
5.5.5	Datos de reducción de emisiones	49
5.5.6	Clima	49
5.5.7	Incertidumbres.....	49
5.5.8	Impactos	50
5.5.8.1	Agricultura	50
5.5.8.2	Bosques	50
5.5.8.3	Elevación del nivel del mar.....	50
5.5.8.4	Salud	51
5.5.8.5	Consumo de energía.....	53
5.5.8.6	Recursos hídricos	53
5.5.8.7	Migración	53
5.6	Metodología	53

5.6.1	Emisiones	53
5.6.2	Costos de Reducción	54
5.6.3	Atmósfera y clima	55
5.6.3.1	Concentración	55
5.6.3.2	Emisiones de CO ₂	56
5.6.3.3	Forzamiento radiactivo	57
5.6.3.4	Temperatura	57
5.6.3.5	Nivel del mar.....	57
5.6.4	Parámetros económicos y sociales	58
5.6.5	Impactos	58
5.6.5.1	Agricultura	58
5.6.5.2	Bosques	59
5.6.5.3	Especies, ecosistemas y paisajes.....	60
5.6.5.4	Elevación del nivel del mar.....	60
5.6.5.5	Impactos en salud humana	62
5.6.5.6	Consumo de energía.....	66
5.6.5.7	Recursos hídricos	66
5.6.5.8	Migración.....	66
5.6.6	Opciones.....	67
5.6.7	Costos marginales	68
5.7	Salidas del FUND.....	69
5.7.1	Resumen de las condiciones ambientales globales por Año, (climate.out)	69
5.7.2	Resumen de daños, valores anuales (damage.out)	70
5.7.3	Resumen de resultados (summary.out)	70
5.7.4	Impactos en salud, por años y regiones.....	71
5.7.5	Costos / Ingresos, por años y regiones.....	71
5.7.6	Población / Emisiones, por años y regiones.....	71
5.7.7	Salidas con otras opciones no habilitadas por defecto.....	71
5.7.7.1	Análisis de Costos Beneficios, ACB (con y sin cooperación), Análisis Costo Efectividad, ACE (sin cooperación).....	71
5.7.7.2	ACE (con cooperación).....	72
5.7.7.3	Costos marginales	72
5.7.7.4	Incertidumbres	72
5.8	Implementación del modelo	72
6.	VALORACIÓN COMPARATIVA.....	73
7.	CONCLUSIONES	79
ANEXO 1	Unidades de medida, prefijos, factores de conversión y equivalencias	81
ANEXO 2	Glosario de términos y abreviaturas	82
	BIBLIOGRAFÍA	85

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro

1	Regiones en PAGE2002.....	12
2	Especificación Temporal en PAGE2002	12
3	Regiones en RICE	29
4	Variables y parámetros exógenos.....	39
5	Variables endógenas.....	42
6	Costos estimados claves.....	42
7	Ejemplos de casos para evaluar políticas en el modelo RICE	44
8	Regiones en FUND 2.8	46
9	Años de vida perdidos por casos	53
10	Parámetros de la ecuación de concentración de CH ₄ y N ₂ O.....	56
11	Parámetros de la ecuación de concentración de CO ₂	56
12	Razón de los impactos de morbilidad y mortalidad	65
13	Esquemas de descuentos	70
14	Valoración comparativa de los modelos PAGE2002, RICE y FUND.	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figuras

Página

1	Metodología Vías de Impacto. Contaminación atmosférica local y regional.....	5
2	Metodología Vías de Impacto. Contaminación atmosférica global	6
3	Costos del cambio climático en función del incremento de la temperatura Calculados por los tres modelos para diferentes escenarios y criterios de agregación de los resultados.....	74

RESUMEN

La complejidad de un estudio sobre los impactos del cambio climático, requiere una metodología que aborde todos los aspectos involucrados. Esto puede realizarse mediante los modelos integrados de valoración del cambio climático (MIVCC).

Actualmente existen varios MIVCC que difieren en alcance, opciones y en nivel de detalle. El presente documento contiene una descripción de tres de estos modelos: PAGE2002, RICE y FUND, considerados entre los más usados y referenciados, con el fin de soportar la toma de decisiones sobre el o los modelos a utilizar en futuros estudios para la región de Centro América y el Caribe y ofrecer una guía preliminar para su uso.

Estos modelos tienen sus propias particularidades. El PAGE2002 es muy flexible para evaluar escenarios de desarrollo; la fortaleza del modelo RICE radica en el análisis económico y resulta potente para la evaluación de políticas, mientras que el módulo de estimación de impactos de FUND es el más detallado y permite desagregar los impactos en diferentes sectores.

Desde el punto de vista de la resolución regional, el modelo FUND es óptimo para ser aplicado en estudios que vinculen a México y a los países de Centro América, por cuanto define una región que agrupa entre las 16 regiones que considera. RICE usa ocho regiones agregadas de acuerdo con el desarrollo económico y no a la cercanía geográfica, por lo que la posibilidad de crear una región con los países del área no parece factible. PAGE2002 también define ocho regiones de acuerdo con criterios geográficos, definidos por el usuario. De forma que Centro América podría ser una de las regiones analizadas por el modelo.

La resolución temporal del FUND también es la más detallada, al utilizar pasos anuales durante 350 años. Esto por una parte representa un mayor grado de detalle en los resultados, pero a su vez exige mayores esfuerzos en el procesamiento de los datos de entrada que deben ajustarse a este requerimiento. PAGE2002 establece 10 periodos de paso variable, entre el 2000–2200. RICE maneja periodos de 10 años entre 1995 y 2335.

PAGE2002 evalúa tres de los gases de efecto invernadero directo: dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y hexafluoruro de azufre (SF_6), mientras RICE sólo considera como endógeno el CO_2 proveniente de fuentes industriales. FUND, además de los principales gases de efecto invernadero: CO_2 , CH_4 y óxido nitroso (N_2O) modela las emisiones de dióxido de azufre (SO_2) y su influencia en el forzamiento radiactivo, ocasionado por los aerosoles de sulfato de los que es precursor.

PAGE2002 y RICE consideran posibles eventos extremos (discontinuidades) a gran escala como consecuencia del aumento de la temperatura por encima de valores donde no es posible una adaptación, y los cuales se espera tendrán un peso fundamental en los costos del cambio climático para altos niveles de calentamiento. PAGE2002 evalúa adicionalmente dos posibles efectos de retroalimentación del clima: debilitamiento de los sumideros de carbón al alterarse la tasa de absorción de carbón por las plantas e incremento de las emisiones naturales de metano al derretirse el permafrost.

La estimación de impactos es global, a nivel de costos, para el PAGE2002 y el RICE. Por el contrario, el FUND desagrega el análisis de varios sectores: agricultura, silvicultura, consumo de energía y recursos hídricos, impactos debido a la elevación del nivel del mar y migración, salud humana (desagregada por varias enfermedades y diferenciando los casos de mortalidad y morbilidad), ecosistemas y especies. PAGE2002 y RICE consideran los impactos expresados como costos y sin desagregar.

El tratamiento de las incertidumbres es una fortaleza de PAGE2002 y FUND, ambos utilizan el método de Monte Carlo, aunque PAGE2002 utiliza la técnica de muestreo Hipercubo Latino, superior a la técnica tradicional de muestreo aleatorio.

FUND y RICE están disponibles en calidad de código libre, sin embargo RICE necesita GAMS para desarrollar todas sus potencialidades. PAGE2002 no está disponible libremente, ni la herramienta @risk que necesita.

1. INTRODUCCIÓN

La evidencia científica de que el cambio climático presenta riesgos globales muy serios y exige acciones globales urgentes, es aplastante.

Hay todavía tiempo para evitar los peores impactos del cambio climático, si se realizan acciones importantes a corto plazo. La mitigación del cambio climático puede ser vista como una inversión. Los costos de las acciones son significativos pero manejables; el retraso sería peligroso y mucho más costoso. Se mencionan costos anuales de estabilización a 500–550 ppm de CO₂e del orden del 1% del Producto Interno Bruto (PIB) mundial para 2050.

Resulta incuestionable que el cambio del clima amenaza los elementos básicos de vida para las personas: la agricultura, la producción de alimentos, la salud, el uso de la tierra y el medio ambiente.

La magnitud de los impactos depende del valor absoluto de los efectos y de la razón de cambio (velocidad) con que estos ocurran. Se prevé que dichos impactos se acelerarán en la medida en que avance el calentamiento global. La adaptación al cambio climático es crucial para minimizar los impactos inevitables.

La distribución de los impactos del cambio climático no es uniforme, pues los países más pobres sufrirán los mayores impactos y a más corto plazo. En contraposición a esto, el cambio del clima podría tener inicialmente efectos positivos pequeños para algunos países desarrollados.

El crecimiento económico ha sido y continúa siendo determinante en el nivel de emisiones, pero existen opciones para reducirlas sin frenar el desarrollo. Deben trazarse políticas que motiven que estas acciones sean tomadas, tales como el establecimiento de precios para el carbón (a través del impuesto, comercio o regulación), el desarrollo tecnológico y la eliminación de barreras a los cambios de comportamiento, entre otras. Frenar la deforestación es una manera muy rentable de reducir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI).

Es imprescindible impulsar y sostener acciones de cooperación internacional que involucren a todos los países. Una mayor cooperación internacional para acelerar la innovación tecnológica y difundir sus resultados, reducirá los costos de mitigación.

Se han aplicado diferentes vías para abordar la modelación económica del cambio climático:

- Técnicas desagregadas: considerando los impactos físicos del cambio climático en la economía, la salud humana y el medio ambiente y examinando los costos de diferentes tecnologías y estrategias para reducir las emisiones de GEI.
- Modelos económicos:
 - Modelos integrados de valoración del cambio climático, (MIVCC).

- Modelos macro-económicos que calculan los costos y efectos de la transición a sistemas de energía con bajo contenido de carbón sobre la economía global.
- Comparaciones de los niveles actuales y tendencias futuras de los costos de los impactos asociados a las emisiones de GEI con respecto a los costos de su reducción.

Dada la complejidad del cambio climático, los tomadores de decisión requieren una síntesis coherente de todos los aspectos involucrados, que sólo puede ser ofrecida por una valoración integrada. La valoración integrada es un proceso interdisciplinario de combinación, interpretación y comunicación de conocimientos de diversas disciplinas científicas que permite de manera relativamente sencilla, evaluar el conjunto completo de interacciones causa-efecto relacionados con un problema (Ahmad y otros 2001).

Los modelos integrados de valoración del cambio climático (MIVCC) constituyen una herramienta útil y sus resultados recientes sugieren que los impactos pudieran resultar superiores a los que fueran estimados con anterioridad. Los modelos macro-económicos confirman estas estimaciones. Aunque el nivel de incertidumbre en las valoraciones es elevado, existen evidencias suficientes para dar crédito a los riesgos que implicaría no realizar acciones de mitigación.

El presente documento contiene una descripción de diferentes modelos integrados de valoración y una comparación de ellos, con el fin de soportar la toma de decisiones sobre el o los modelos a utilizar en futuros estudios para la región de Centro América y el Caribe.

2. MODELOS INTEGRADOS DE VALORACIÓN

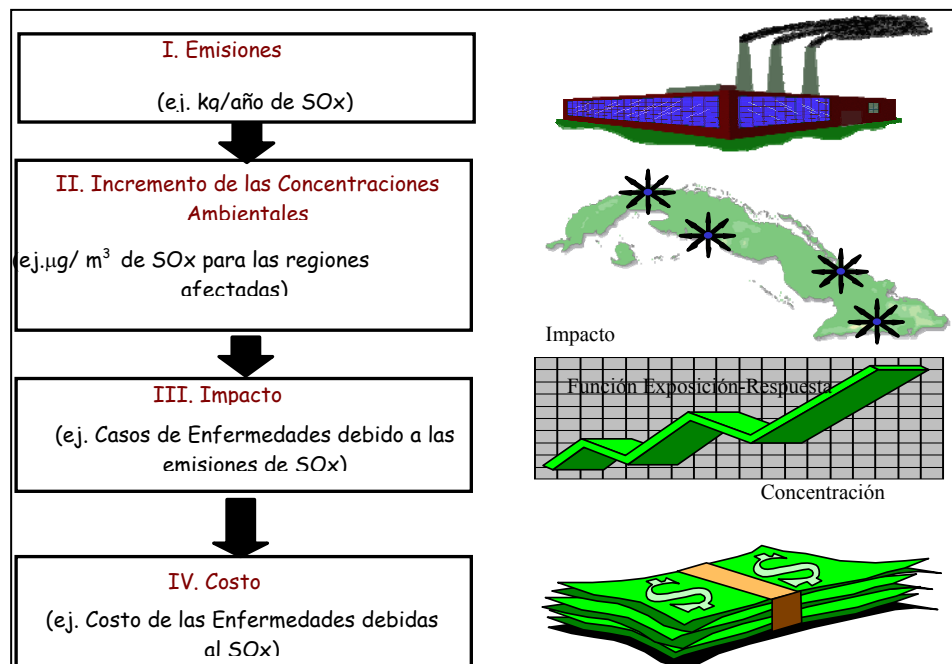
2.1. Externalidades

El cambio climático puede ser considerado como una externalidad asociada con las emisiones de GEI por cuanto se expresa en costos que no son asumidos por quienes generan las emisiones. Sin embargo, tiene varias características esenciales que lo distinguen de otras externalidades: es global en sus causas y consecuencias; los impactos son a largo plazo y persisten por mucho tiempo; las incertidumbres y los riesgos de los impactos constituyen la clave de las valoraciones.

La Metodología Vías de Impacto, aplicada para estimar las externalidades ocasionadas por la contaminación atmosférica a nivel local y regional (véase la figura 1), resulta también válida para evaluar la contaminación global ocasionada por las emisiones de gases de efecto invernadero, responsable del cambio climático, siguiendo los pasos que muestran en la figura 2.

Figura 1

METODOLOGÍA VÍAS DE IMPACTO. CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA LOCAL Y REGIONAL



Fuente: Elaboración propia con base en European Commission, ExternE, 1995.

2.2. Generalidades de los modelos: premisas y resultados generales

La modelación del impacto global del cambio del clima representa un desafío extraordinario, pues involucra períodos de tiempo muy largos (un siglo o más) y, además, los efectos aparecen con retrasos, son muy duraderos y afectan a todo el mundo.

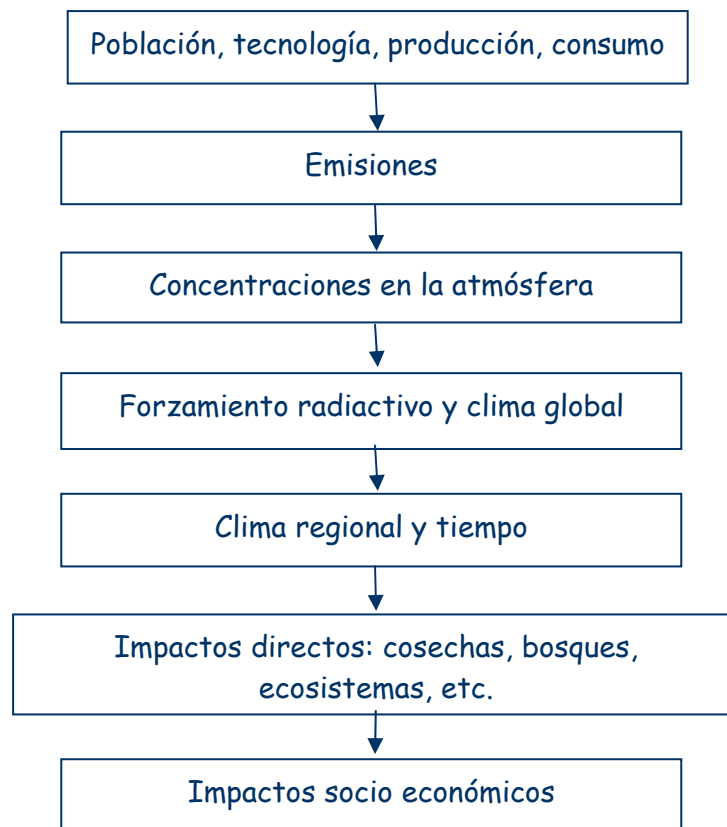
Actualmente existen varios MIVCC que difieren en alcance y en nivel de detalle, aunque todos cubren los pasos indicados en la figura 2.

Los parámetros usados en los modelos como datos de entrada están calibrados de acuerdo con los resultados de numerosas investigaciones científicas y económicas. Los modelos, en realidad, resumen los resultados de estos estudios precedentes.

Los resultados de los modelos dependen de las consideraciones utilizadas, fundamentalmente: 1) ¿cómo son valorados los costos en las regiones pobres? y, 2) ¿qué se asume respecto de la capacidad de las sociedades de reducir los costos adaptándose al cambio climático?

Figura 2

METODOLOGÍA VÍAS DE IMPACTO. CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA GLOBAL



Fuente: Smith y otros, 2001.

Hasta el momento, en todos los modelos, tanto los datos de entrada como los resultados están dados por regiones o son globales. Los costos calculados (daños generados por el cambio climático, los costos de adaptación y de reducción de las emisiones) son sustraídos del PIB proyectado.

Es importante la interpretación de los resultados. Las proyecciones obtenidas permiten ilustrar los riesgos involucrados a pesar de sus elevadas incertidumbres. El modelado de muchas décadas y regiones, demanda juicios éticos de manera sistemática y explícita. Por ejemplo, si se le da poco peso a los efectos futuros mediante el empleo de tasas de descuento altas, se producirían estimaciones bajas de los costos y, consecuentemente, no se tomarían acciones para frenar el cambio climático.

La mayoría de los modelos usan como un punto de partida un calentamiento global de 2–3 °C. En este rango de temperaturas, el costo del cambio climático oscila entre 0% y 3% de pérdida del PIB global con respecto a lo que podría lograrse en un mundo sin cambio climático. Los países pobres sufrirán los costos más altos.

Realmente, si no se toman medidas (escenario conocido como Business as Usual – BAU) los aumentos de temperatura pueden exceder 2–3 °C a fines de este siglo. Esto aumenta la probabilidad de otros impactos adicionales a los previamente considerados y más difíciles de cuantificar como, por ejemplo, el cambio abrupto y a gran escala del clima.

Con 5–6 °C de calentamiento global, los modelos que incluyen este impacto (PAGE2002 y DICE/RICE) sugieren pérdidas entre 5% y 10% del PIB global, y mayores aún en los países pobres. Estos costos pueden resultar incluso superiores si se tienen en cuenta:

- Los costos por inestabilidad social y política.
- La posible retroalimentación amplificada en el sistema del clima.
- La carga desproporcionada del cambio climático que cae sobre las regiones más pobres.

Bajo estas condiciones, el intervalo de confianza se extiende a un rango más ancho de valores, lo que permite dar crédito a la posibilidad de pérdidas sumamente altas.

Además de los modelos considerados como MIVCC, para modelar el cambio climático existe un gran espectro de modelos con diferentes niveles de complejidad y aplicabilidad que van desde modelos climáticos tridimensionales océano–atmósfera hasta modelos climáticos simples:

- modelos climáticos tridimensionales océano–atmósfera de gran complejidad que integran modelos de circulación general de la atmósfera, océanos, hielos marinos y procesos en la superficie terrestre; que requieren recursos computacionales importantes, elevados tiempo de ejecución, volumen considerable de datos de entrada y salida del orden de los Gb.
- modelos de complejidad intermedia, que describen mucho de los procesos implícitos en los complejos pero en una forma más simple, lo que permite simular largos períodos de tiempo a escala global.

- modelos climáticos simples, con reducida complejidad cuyos resultados reflejan solamente medias globales de temperatura en superficie e incremento del nivel del mar.

A continuación se relacionan los MIVCC que serán analizados en este documento, considerados entre los más usados y conocidos. De hecho han sido empleados y referenciados en importantes estudios como el Tercer Informe de Evaluaciones, TIE, del IPCC (siglas en inglés de International Panel on Climate Change), (Smith y otros, 2001), Estudio Stern, (Stern, 2007) y otros estudios, y el proyecto ExternE, 2005.

1) **PAGE2002: Policy Analysis of the Greenhouse Effect 2002** (Hope, 2006)

Modelo desarrollado por Chris Hope, Universidad de Cambridge.

Usa la simulación de Monte Carlo para generar una distribución probable de los resultados en lugar de un valor puntual. Específicamente, obtiene una distribución de probabilidad de la diferencia de la proyección de una línea base del PIB y los costos debidos al cambio climático, incluido los de adaptación.

Evalúa como un todo, dos tipos de impactos: los tangibles y los intangibles.

El modelo permite la evaluación de los impactos provocados por eventos climáticos extremos para incrementos importantes de la temperatura. También considera dos posibles efectos de retroalimentación del clima: debilitamiento de los sumideros de carbón al alterarse la tasa de absorción de carbón por las plantas e incremento de las emisiones naturales de metano al derretirse el permafrost.

2) **RICE: Regional dynamic Integrated model of Climate and the Economy** (Nordhaus y Boyer, 1999)

Modelo propuesto por William Nordhaus, Universidad de Yale. Es la versión del DICE (**D**ynamic **I**ntegrated model of **C**limate and the **E**conomy) para la estimación por regiones. La última versión disponible es del 2001. Los modelos y la documentación están disponibles en <http://www.econ.yale.edu/~nordhaus/homepage>.

El RICE evalúa impactos tangibles (en sectores de mercado): agricultura, silvicultura, consumo de energía y agua, construcción, pesca; e intangibles (en sectores de no-mercado): recreación al aire libre, zonas costeras, mortalidad por enfermedades relacionadas con el clima y la polución, y ecosistemas.

Incluye las evaluaciones de los impactos de eventos climáticos extremos. Se obtiene que estos impactos tendrán un peso fundamental en los costos del cambio climático para altos niveles de calentamiento.

El modelo predice que el costo de cambio climático aumentará con una razón de cambio mayor que la temperatura media global, de modo que las pérdidas agregadas en el PIB global serán casi el doble cuando los aumentos de temperatura asciendan de 4 °C a 6 °C por encima de los niveles preindustriales. Esto tiene su origen en el hecho de que aumentos considerables de temperatura aumentarán la probabilidad de que se desencadenen cambios abruptos y a gran escala, como los cambios súbitos en los patrones regionales del clima (ejemplo: fenómeno El Niño).

3) FUND: Climate Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution.

Modelo desarrollado por Richard Tol, Universidad de Hamburgo. La última versión disponible es el FUND 2.8. Los modelos y la documentación están disponibles en <http://www.fnu.zmaw.de/FUND.5679.0.html>.

FUND parte de un conjunto de escenarios exógenos y perturbaciones endógenas, específicas para las regiones consideradas. Evalúa impactos tangibles (en sectores de mercado): agricultura, silvicultura, consumo de energía y agua; e intangibles (en sectores de no-mercado): zonas costeras y ecosistemas, así como la mortalidad por enfermedades inducidas por vectores, diarrea, y cambios de temperatura. Los costos son ponderados usando diferentes esquemas de agregación. El tratamiento de incertidumbres se realiza aplicando el método de Monte Carlo (Tol Richard, 2003).

El modelo obtiene que el incremento inicial de la temperatura pudiera producir beneficios netos globales. Como estos beneficios se producirán en los países ricos, el método de agregación utilizado entre las regiones resulta de importancia vital para estimar adecuadamente la magnitud del beneficio global.

2.3. Agregación de los resultados

Los resultados de cada modelo dependen grandemente de cómo se agregan los impactos por regiones, y en particular cómo se valoran los costos en las regiones pobres con respecto a las ricas.

Los precios de los productos y servicios son más altos en los países ricos. Los valores hipotéticos asignados a la salud y el ambiente, son típicamente más altos en los países ricos que en los países pobres. Así, en estos modelos, un 10% de pérdida en el volumen de producción de un sector económico es más valorado en un país rico que en un país pobre. Igualmente, un 5% de aumento en la mortalidad, si el 'valor de la vida' es basado en la voluntad a pagar, es mayor desde el punto de vista puramente monetario, en un país rico que un país pobre. Muchos observadores éticos rechazarían estas declaraciones. Así, algunos de los modelos permiten que, al agregar los resultados, estos puedan ser ponderados por equidad o por bienestar.

En resumen, si la agregación se hace sumando directamente los valores de ingresos o PIB, entonces los grandes impactos físicos en los países pobres son enmascarados por los pequeños impactos en los países ricos. La sección del FUND que trata los costos marginales presenta las

ecuaciones utilizadas para realizar la agregación sin ponderar o mediante una ponderación con equidad.

2.4. Adaptación

La adaptación al cambio climático brinda la posibilidad de reducir en forma sostenible su impacto. Una adaptación previsor y planeada pudiera contribuir a evitar muchos de los elevados costos ecológicos, sociales y económicos derivados de depender sólo de una adaptación autónoma de reacción a los efectos acumulativos. Diseñadas apropiadamente, muchas estrategias de adaptación pueden proporcionar beneficios múltiples a mediano y largo plazo. La mejora de la capacidad de adaptación reduce la vulnerabilidad de sectores y regiones al cambio climático, contribuyendo de este modo a la equidad y el desarrollo sostenible.

Sin embargo en muchos países las políticas y las condiciones económicas que determinan las decisiones individuales, las estrategias de desarrollo y las pautas de utilización de los recursos dificultan la puesta en práctica de medidas de adaptación. El reforzamiento de los marcos jurídicos e institucionales, la eliminación de las distorsiones en el mercado y el fomento de la participación pública y la educación son algunos de los medios que permitirían lograr la adopción de medidas de adaptación. De este modo se ajustarían a las condiciones medioambientales vigentes las pautas de utilización de los recursos y se prepararían mejor los sistemas frente a posibles cambios futuros.

Las características del cambio climático más importantes para la vulnerabilidad y la adaptación están relacionadas no sólo con las nuevas condiciones medias sino con la variabilidad y los extremos. La capacidad de adaptación difiere notablemente entre países, regiones y grupos socioeconómicos y varía a lo largo del tiempo. La capacidad para adaptarse es función de la riqueza, el nivel de desarrollo científico técnico, las aptitudes técnicas, la infraestructura, las instituciones y la equidad.

Las claves del análisis de adaptación en los modelos radica en definir: 1) el nivel de adaptación que puede asumirse sin un estímulo político adicional (financiero, legal, etc.) y 2) el costo de la adaptación y sus beneficios.

Cada uno de los modelos trata la adaptación de forma diferente según se describe en los capítulos correspondientes.

3. PAGE2002

El modelo PAGE2002 (Policy Analysis of the Greenhouse Effect 2002) (Hope, 2006) constituye una versión actualizada de su antecesor el modelo PAGE95. Es una aplicación Excel que utiliza la técnica de muestreo Hipercubo Latino para seleccionar entre los parámetros con incertidumbres ¹ utilizados por el modelo, un juego de datos para cada una de las corridas, generando de esta manera una distribución de probabilidad de los resultados. No se encuentra actualmente disponible una versión libre del modelo.

La metodología seguida por el modelo da respuesta a la necesidad de evaluar las cinco razones de preocupación identificadas por el IPCC en su Tercer Informe de Evaluación (Smith y otros, 2001).

- Riesgos para ecosistemas únicos y amenazados,
- Riesgos por eventos climáticos extremos,
- Distribución de Impactos,
- Agregación de Impactos y
- Riesgos por discontinuidades futuras a gran escala.

Los principales cambios en el modelo en comparación con su antecesor, son la introducción de un tercer gas en la evaluación, SF₆; la evaluación de posibles discontinuidades futuras a gran escala y la actualización del conjunto de parámetros que utiliza el modelo con los cambios introducidos en el Segundo y Tercer Informe de Evaluación del IPCC.

El modelo usa ecuaciones relativamente simples para representar fenómenos climáticos y económicos complejos.

3.1. Especificación regional

El PAGE2002 evalúa ocho regiones geográficas, el subíndice r que aparecerá en las ecuaciones que describen al modelo, corresponderá a cada una de las regiones como se especifica en el cuadro 1.

¹ Parámetros, que a diferencia de los deterministas, no se le asigna un único valor sino un comportamiento estadístico, en este caso representado por el mínimo, la moda y el máximo y que son incluidos en los análisis de incertidumbres.

Cuadro 1**REGIONES EN PAGE2002**

r	Región
0	Unión Europea (región focal)
1	Estados Unidos de América
2	Otras naciones OECD
3	África y Medio Oriente
4	China y Asia Central
5	India y Sudeste Asiático
6	Latinoamérica
7	Ex Unión Soviética y Europa del Este

Fuente: Hope, 2006.

3.2. Especificación temporal

El modelo corre del 2000–2200 según se describe en el siguiente cuadro:

Cuadro 2**ESPECIFICACIÓN TEMPORAL EN PAGE2002**

i	Año
0	2000
1	2001
2	2002
3	2010
4	2020
5	2040
6	2060
7	2080
8	2100
9	2150
10	2200

Fuente: Hope, 2006.

Como se observa, el tamaño del paso temporal va aumentando con el tiempo, por lo que las emisiones calculadas se hacen menos precisas en la medida que éste aumenta. Ya en los últimos años de evaluación, la influencia del tiempo en los costos y en el aumento de la temperatura global se hace muy pequeña (Hope, 2006). El subíndice i que aparecerá en las ecuaciones que describen al modelo, corresponderá con el año i de evaluación.

3.3. Contaminantes considerados

El modelo evalúa solamente tres gases de efecto invernadero: Dióxido de Carbono, Metano y Hexafluoruro de Azufre. El subíndice g (1–3) en las ecuaciones que describen al modelo PAGE2002, corresponderá con un contaminante en la forma que se describe a continuación:

g	Contaminante
1	Dióxido de Carbono (CO_2)
2	Metano (CH_4)
3	Hexafluoruro de Azufre (SF_6)

3.4. Características del modelo

El modelo calcula:

- Las emisiones de los GEI primarios, CO_2 , CH_4 y SF_6 , debido a la actividad humana e incluso los cambios en las emisiones naturales estimuladas por el propio cambio climático.
- La acumulación de emisiones antropogénicas de GEI en la atmósfera. Estima, además, el forzamiento radiactivo de los tres gases de efecto invernadero evaluados y el forzamiento radiactivo total, considerando el aporte de otros gases no evaluados.
- El enfriamiento por aerosoles de sulfatos.
- La temperatura de equilibrio para las ocho regiones consideradas en el modelo, sobre la base de la diferencia entre el calentamiento provocado por los GEI y el enfriamiento de los aerosoles de sulfatos, el incremento en la temperatura regional y la temperatura media global. El cálculo se realiza mediante la suma de los incrementos en las temperaturas regionales, ponderada de acuerdo con el área que representa cada región.
- El impacto de las emisiones de GEI sobre el cambio climático, como función del aumento de la temperatura regional por encima de un nivel tolerable.
- Los impactos en cada una de las regiones, en sectores de tipo económico y no económico.
- Los impactos agregados y descontados, usando tasas de descuento variables en el tiempo.
- Los costos de adaptación y prevención al cambio climático. La adaptación puede incrementar el nivel tolerable de aumento de la temperatura y reducir las intensidades de los impactos económicos y no económicos.
- La posibilidad de una discontinuidad futura de gran escala, cuya probabilidad de ocurrencia experimenta un incremento lineal cuando la temperatura global aumenta por encima de un cierto valor umbral.

3.5. Datos de entrada

Los datos de entrada del modelo se conforman fundamentalmente por datos del año base, tasas de crecimiento y parámetros con incertidumbres, generalmente específicas para cada contaminante y región de análisis.

3.5.1 Datos del año base

- 1) Concentraciones preindustriales de los contaminantes, ppb.
- 2) Densidad de los gases, Mton/ppb.
- 3) Pendiente de la ecuación del forzamiento radiactivo para cada contaminante.
- 4) Por ciento de las emisiones que ingresan a la atmósfera, %.
- 5) Por ciento de las emisiones que permanecen en la atmósfera, %.
- 6) Concentración de los contaminantes en el año base, ppb.
- 7) Forzamiento radiactivo en el año base, W/m^2 .
- 8) Área que ocupa cada región, m^2 .
- 9) PIB de cada región en el año base (GDP), M\$.
- 10) Emisiones de los contaminantes en cada región en el año base, Mton.
- 11) Formación de sulfatos por región en el año base, Tg.
- 12) Flujo natural de sulfatos por región en el año base, Tg/ km^2 .
- 13) Incremento de la temperatura regional en el año base, °C.

3.5.2 Tasas de crecimiento

- 14) Tasa de crecimiento del PIB por regiones por año, %
- 15) Tasa de crecimiento de la población por regiones por año, %
- 16) Por ciento que representan las emisiones de sulfatos con relación al año base por regiones por año, %.
- 17) Por ciento que representan las emisiones de contaminantes con relación al año base teniendo en cuenta los diferentes escenarios (ej. BAU, con política de adaptación, Escenarios del IPCC, etc.) para las regiones consideradas, %.
- 18) Nivel tolerable de incremento de la temperatura por regiones por año, °C.
- 19) Tasa tolerable de incremento de la temperatura por regiones por año, °C/año.
- 20) Reducción en los impactos debido a la política de adaptación por año, por región, por sector.

3.5.3 Otros parámetros

- 21) Interacción CH_4/N_2O por año, W/m^2 .
- 22) Exceso en el forzamiento radiactivo como consecuencia de otros gases por año, W/m^2 .

3.5.4 Parámetro con incertidumbre

- 23) Estimulación natural de las emisiones CO_2 , Mton/°C.

- 24) Incremento directo de forzamiento radiactivo por unidad de flujo de azufre, MWaño/kg.
- 25) Incremento en el forzamiento indirecto al duplicarse el flujo natural de azufre, W/m².
- 26) Tiempo de residencia media en la atmósfera para los contaminantes, año.
- 27) Por ciento de CO₂ emitido, %.
- 28) Tiempo medio de la respuesta global al incremento del forzamiento, año.
- 29) Temperatura de equilibrio al duplicarse las emisiones CO₂, °C.
- 30) Exponente de la función de impacto.
- 31) Impacto económico y no-económico como por ciento de pérdida de PIB, para un incremento de la temperatura en 2,5 °C en Europa.
- 32) Pérdida de PIB si ocurre una discontinuidad en Europa, %.
- 33) Multiplicadores de peso regional para estimar la pérdida de PIB si ocurre una discontinuidad.
- 34) Tasa tolerable de incremento de la temperatura para los sectores económico y no-económico de Europa en el año base, °C/año.
- 35) Nivel tolerable de incremento de la temperatura para los sectores económico y no-económico de Europa en el año base, °C.
- 36) Multiplicador regional de la tasa tolerable y el nivel tolerable de incremento de la temperatura.
- 37) Nivel tolerable de aumento de la temperatura sin riesgo significativo de discontinuidad, °C.
- 38) Probabilidad de que ocurra una discontinuidad, %/°C.
- 39) Tasa de preferencia temporal pura.
- 40) Costo de adaptación a la tasa tolerable de cambio para la región de referencia en el año base.
- 41) Costo de la adaptación al impacto para la región de referencia en el año base.
- 42) Costos de adaptación al nivel tolerable de cambio para la región de referencia en el año base.
- 43) Multiplicadores regionales para los costos de adaptación.
- 44) Multiplicadores regionales para los costos de prevención.

Los parámetros con incertidumbre han sido extraídos fundamentalmente de los informes de evaluación del IPCC (IPCC, 2001a; e IPCC, 2001b) u obtenidos de los autores del modelo.

3.6. Metodología

Las ecuaciones que se muestran a continuación describen la metodología seguida por el modelo PAGE2002 y fueron tomadas de Hope (2006). Los subíndices g , i , r , representan el contaminante, el año de análisis y la región respectivamente. Cuando se trate del año base, en lugar del subíndice i aparece θ .

3.6.1 Cálculo de emisiones

La concentración en exceso ($EXC_{g,\theta}$) de los GEI causadas por la actividad humana en el año base es calculada como la diferencia entre la concentración en dicho año ($C_{g,\theta}$) y la concentración preindustrial (PIC_g):

$$(3-1) \quad EXC_{g,0} = C_{g,0} - PIC_g, \text{ ppb}$$

A partir de la ecuación anterior se estima el nivel de emisiones que permanece en la atmósfera en el año base, $RE_{g,0}$, multiplicando por la densidad del gas DEN_g .

$$(3-2) \quad RE_{g,0} = EXC_{g,0} \cdot DEN_g, \text{ Mton}$$

Las emisiones naturales de GEI, $NtE_{g,i}$ estimuladas por el incremento de la temperatura, son estimadas mediante la multiplicación de $STIM_g$, parámetro de retroalimentación biosférica, que representa la estimulación natural de las emisiones en Mton/°C, por la temperatura media global. Esta última se obtiene como una media de los incrementos de las temperaturas promedio regionales $RT_{i,r}$, ponderada por la fracción que representa el área de cada región $AREA_r$ respecto del área total.

$$(3-3) \quad NtE_{g,i} = STIM_g \frac{\sum_r RT_{i-1,r} AREA_r}{\sum_r AREA_r}, \text{ Mton}$$

Las emisiones de GEI debidas a la actividad humana en el año i , $E_{g,i}$, son calculadas como la suma de las emisiones regionales, las que son estimadas a su vez, como un por ciento de las emisiones del año base:

$$(3-4) \quad E_{g,i} = \sum_r E_{g,i,r}, \text{ Mton}$$

$$(3-5) \quad E_{g,i,r} = ER_{g,i,r} \frac{E_{g,0,r}}{100}, \text{ Mton}$$

Donde:

$ER_{g,i,r}$, es el por ciento que representan las emisiones de GEI en la región con relación al año base, %;

$E_{g,0,r}$, son las emisiones de GEI en el año base, Mton.

Las emisiones totales a la atmósfera en el año i , $TEA_{g,i}$, se calculan de la siguiente forma:

$$(3-6) \quad TEA_{g,i} = (E_{g,i} + NtE_{g,i}) \frac{AIR_g}{100}, \text{ Mton}$$

Donde AIR_g , representa el por ciento de las emisiones que ingresa a la atmósfera. La consideración de que sólo un por ciento de las emisiones pasa a formar parte de la atmósfera modela el rápido decaimiento inicial del CO₂. Posteriormente, este proceso de decaimiento continúa más lentamente, siguiendo una ley exponencial.

Las emisiones totales a la atmósfera, ocurridas en el intervalo de tiempo comprendido entre los años de análisis Y_i y Y_{i-1} , se representan como $TEAY_{g,i}$ y se calculan mediante la siguiente interpolación lineal:

$$(3-7) \quad TEAY_{g,i} = (TEA_{g,i} + TEA_{g,i-1}) \frac{Y_i - Y_{i-1}}{2}, \text{ Mton}$$

Por otra parte, la variable $CEA_{l,i}$ representa las emisiones acumuladas de CO_2 ($g = l$) en la atmósfera desde el año base hasta el año i . Como caso particular, el total de emisiones antropogénicas hasta el año base, $CE_{l,0}$, se determina mediante la expresión:

$$(3-8) \quad CEA_{l,0} = CE_{l,0} \frac{AIR_l}{100}, \text{ Mton}$$

Donde AIR_l , representa el por ciento de las emisiones de CO_2 que ingresa a la atmósfera.

Las emisiones de CO_2 acumuladas desde el año base hasta el año i , se podrán estimar como la suma de las emisiones acumuladas hasta el año anterior ($CEA_{l,i-1}$) y el total de emisiones ocurridas en el intervalo de tiempo entre los dos años ($TEAY_{l,i}$).

$$(3-9) \quad CEA_{l,i} = CEA_{l,i-1} + TEAY_{l,i}, \text{ Mton}$$

Para el metano y el hexafluoruro de azufre, las emisiones que permanecen en la atmósfera en el año i , $RE_{g,i}$, se determinan como resultado del balance entre el incremento de las emisiones ocurridas desde el año anterior $i-1$ y el decremento en la masa del contaminante por efecto de interacciones químicas y otros procesos. Esto se modela mediante la expresión:

$$(3-10) \quad RE_{g,i} = RE_{g,i-1} e^{\frac{Y_i - Y_{i-1}}{RES_g}} + \frac{TEAY_{g,i} RES_g \left(1 - e^{\frac{Y_i - Y_{i-1}}{RES_g}} \right)}{Y_i - Y_{i-1}}, \text{ Mton}$$

Donde, RES_g es el tiempo de vida medio de residencia del gas en la atmósfera y el subíndice g representa los gases 2-3 solamente.

La expresión anterior tiene en cuenta el hecho de que el tiempo de vida media de residencia del metano en la atmósfera es del mismo orden que el paso temporal que emplea el modelo. De esta forma, una fracción significativa de las emisiones desaparece antes de que se alcance el año siguiente. La expresión resulta una mejor aproximación si las emisiones permanecen aproximadamente constantes a partir del año anterior ($i-1$), lo cual es razonable cuando las emisiones varían lentamente en el tiempo, como ocurre en la práctica.

Para el CO_2 , se aplica también una expresión similar que toma en cuenta el balance entre las emisiones que permanecen en la atmósfera y los procesos de decaimiento por interacciones químicas y otros. Esto se modela mediante la expresión:

$$(3-11) \quad RE_{1,i} = STAY_1 CEA_{1,i-1} \left(1 - e^{-\frac{Y_i - Y_{i-1}}{RES_1}} \right) + RE_{1,i-1} e^{-\frac{Y_i - Y_{i-1}}{RES_1}} + TEAY_{1,i} e^{-\frac{Y_i - Y_{i-1}}{2RES_1}}, \text{ Mton}$$

Donde, $STAY_1$ representa la proporción de las emisiones de CO_2 que permanecen en la atmósfera

Como el tiempo de vida media de residencia en la atmósfera del CO_2 es mucho mayor que el paso temporal que emplea el modelo entre los años considerados, se asume que las emisiones correspondientes al intervalo de tiempo entre el año actual y el anterior ocurren en el punto medio del intervalo ente dichos dos años de estudio.

La concentración de cada gas en la atmósfera en el año i , $C_{g,i}$, es estimada como la concentración preindustrial, más el exceso de concentración en el año base, escalado sobre la base de las emisiones que permanecen en la atmósfera comparadas con el año base.

$$(3-12) \quad C_{g,i} = PIC_g + EXC_{g,0} \frac{RE_{g,i}}{RE_{g,0}}, \text{ ppb}$$

3.6.2 Forzamiento radiactivo

Para el CO_2 , se asume que la concentración es lo suficientemente alta (cientos de partes por millón), tal que el forzamiento radiactivo extra $F_{1,i}$ puede considerarse proporcional al logaritmo de la concentración, según la siguiente expresión:

$$(3-13) \quad F_{1,i} = F_{1,0} + FSLOPE_1 \ln \left(\frac{C_{1,i}}{C_{1,0}} \right), \text{ W/m}^2$$

Donde: $FSLOPE_1$ es la pendiente de la ecuación del forzamiento radiactivo para el CO_2 .

Para el CH_4 , se asume que el forzamiento radiactivo extra $F_{2,i}$ es proporcional a la raíz cuadrada de la concentración más un término negativo, de valor pequeño, que tiene en cuenta la interacción con el óxido nitroso.

$$(3-14) \quad F_{2,i} = F_{2,0} + FSLOPE_2 \left(\sqrt{C_{2,i}} - \sqrt{C_{2,0}} \right) + OVER_{2,i} - OVER_{2,0}, \text{ W/m}^2$$

Donde: $FSLOPE_2$, es la pendiente de la ecuación del forzamiento radiactivo para el CH_4 , W/m^2 ;

$OVER_{2,i}$, $OVER_{2,0}$, representan la interacción del CH_4 con el N_2O en el año i y el año base respectivamente, W/m^2 .

La concentración del SF_6 es tan baja (menos de una parte por millón) que el forzamiento radiactivo puede considerarse con una dependencia lineal con respecto a la concentración, como muestra la expresión:

$$(3-15) \quad F_{3,i} = F_{3,0} + FSLOPE_3(C_{3,i} - C_{3,0}), \text{ W/m}^2$$

Donde: $FSLOPE_3$ es la pendiente de la ecuación del forzamiento radiactivo para el SF_6 , W/m^2 .

El forzamiento radiactivo extra total en el año i , es calculado como la suma de los forzamientos radiactivos extra para los tres gases de estudio más un término, pequeño en valor, que tiene en cuenta la contribución al exceso de forzamiento radiactivo EXF_i provenientes de otros gases que no han sido incluidos en el modelo, como el N_2O .

$$(3-16) \quad FT_i = \sum_g F_{g,i} + EXF_i, \text{ W/m}^2$$

El forzamiento radiactivo de los aerosoles de sulfato depende del flujo de azufre. El tiempo de vida en la atmósfera y, por tanto, las concentraciones de aerosoles, están determinados por el clima local y la química de la atmósfera, así como por la altura a la cual ocurren las emisiones. Para una concentración de aerosol dada, el forzamiento radiactivo depende de la humedad, la distribución de partículas y el ángulo de incidencia de la luz. En lugar de tratar todos estos fenómenos complejos explícitamente, el PAGE2002 calcula el forzamiento radiactivo de los aerosoles de sulfatos, a partir del flujo de azufre natural (fondo) y dos parámetros con incertidumbre.

PAGE2002 calcula el flujo regional de sulfatos $SFX_{i,r}$ como:

$$(3-17) \quad SFX_{i,r} = SE_{0,r} \frac{PSE_{i,r}}{100} AREA_r, \text{ Tg/km}^2\text{año}$$

Donde:

$SE_{0,r}$, representa la formación regional de sulfatos en el año base, Tg/año ;

$PSE_{i,r}$, representa la formación regional de sulfatos en el año i como por ciento del año base, %;

$AREA_r$, área de la región r , km^2 .

El efecto del forzamiento radiactivo de los aerosoles de sulfatos, $FS_{i,r}$, tiene una componente lineal que representa el efecto directo y otra logarítmica que representa los efectos indirectos (interacción nubosa) (Andreae, 2001).

$$(3-18) \quad FS_{i,r} = 10^6 D SFX_{i,r} + \frac{IND}{\ln 2} \ln \left(\frac{NF_r + SFX_{i,r}}{NF_r} \right), \text{ W/m}^2$$

Donde:

D , es un parámetro con incertidumbre que representa el incremento directo de forzamiento radiactivo por unidad de flujo de azufre, MW-año/Kg ;

IND , es un parámetro con incertidumbre que representa el incremento en el forzamiento indirecto para el doble del flujo natural de azufre, W/m^2 ;

NF , flujo natural de azufre, $\text{Tg/km}^2\text{año}$.

El enfriamiento por aerosoles de sulfatos es mayor en las regiones más industrializadas, y tiende a disminuir con el tiempo debido a las tecnologías de reducción de emisiones para prevenir la lluvia ácida y los efectos negativos en la salud.

3.6.3 Temperatura

La temperatura de equilibrio regional $ET_{i,r}$ puede asumirse como una función lineal del exceso de forzamiento radiactivo neto. La pendiente de esta dependencia lineal expresa el incremento de la temperatura de equilibrio que corresponde a la duplicación de la concentración de CO_2 y se representa por el parámetro de sensibilidad climática $SENS$.

$$(3-19) \quad ET_{i,r} = \frac{SENS}{\ln 2} \frac{FT_i + FS_{i,r}}{FSLOPE_i}, \text{ } ^\circ\text{C}$$

Asumiendo la tierra como un cuerpo homogéneo con una capacidad calorífica alta, que se calienta hasta una temperatura de equilibrio proporcional a la diferencia entre las temperaturas del año considerado y el que le precede de acuerdo con el paso temporal del modelo, se obtiene la siguiente expresión para calcular $RT_{i,r}$, el incremento de la temperatura regional r correspondiente a cada año i en comparación con la temperatura preindustrial que existía en el año 1765:

$$(3-20) \quad RT_{i,r} = RT_{i-1,r} + \left(1 - e^{\frac{Y_i - Y_{i-1}}{OCEAN}}\right) (ET_{i,r} - RT_{i-1,r}), \text{ } ^\circ\text{C}$$

Donde: $OCEAN$ es un parámetro con incertidumbre que representa el tiempo de vida medio, en años, de la respuesta global a un incremento en el forzamiento radiactivo.

La mayor inexactitud de la expresión anterior es considerar la Tierra como cuerpo homogéneo.

La temperatura media global se calcula como el promedio del incremento de la temperatura regional, ponderada por las áreas de las regiones.

$$(3-21) \quad GRT_i = \frac{\sum_r RT_{i,r} \cdot AREA_r}{\sum_r AREA_r}, \text{ } ^\circ\text{C}$$

3.6.4 Parámetros de Impactos

El modelo PAGE2002 modela el daño en dos sectores individuales: económico y no-económico. Se asume que solamente hay impactos por incremento de la temperatura por encima de una tasa tolerable de cambio, $TR_{d,r}$, o superior a un nivel tolerable, $TP_{d,r}$. La tasa tolerable de cambio y el nivel tolerable de incremento de temperatura para la región de referencia (Europa), están representadas por $TR_{d,0}$ y $TP_{d,0}$ respectivamente, ambos datos constituyen parámetros con incertidumbre. Las tasas y los niveles tolerables para las restantes regiones, se asumen proporcionales a los valores correspondientes a la región de referencia.

$$(3-22) \quad TR_{d,r} = TR_{d,0} TM_r, \text{ } ^\circ\text{C/año}$$

$$(3-23) \quad TP_{d,r} = TP_{d,0} TM_r, \text{ } ^\circ\text{C}$$

Donde el subíndice d representa el sector ($d=0$ se corresponde al sector económico y $d=1$ el sector no-económico) y r representa las diferentes regiones exceptuando la región de referencia $r=0$. TM es el multiplicador regional y constituye un parámetro con incertidumbre.

La adaptación puede incrementar el nivel tolerable de elevación de temperatura. Para ello se introducen $PLAT_{i,d,r}$ y $SLOPE_{i,d,r}$ como factores no negativos que caracterizan la política de adaptación. Si la política de adaptación no es tomada en cuenta en el año de análisis i , $PLAT_{i,d,r}$ y $SLOPE_{i,d,r}$ toman el valor de cero. El nivel tolerable y la tasa tolerable, ajustadas de acuerdo con la política de adaptación, $ATP_{i,d,r}$ y $ATR_{i,d,r}$, se estiman mediante las expresiones siguientes:

$$(3-24) \quad ATP_{i,d,r} = TP_{d,r} + PLAT_{i,d,r}, \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$(3-25) \quad ATR_{i,d,r} = TR_{d,r} + SLOPE_{i,d,r}, \text{ } ^\circ\text{C/año}$$

Donde:

$PLAT_{i,d,r}$, representa el incremento en el nivel tolerable debido a la adaptación, en el año i para la región r , en el sector d , $^\circ\text{C}$;

$SLOPE_{i,d,r}$, representa el incremento en la tasa tolerable de cambio debido a la adaptación, en el año i para la región r , en el sector d , $^\circ\text{C/año}$.

El impacto regional del calentamiento global $I_{i,d,r}$ es calculado como el incremento de la temperatura por encima del nivel tolerable ajustado $ATL_{i,d,r}$ y se estima mediante las siguientes expresiones:

$$(3-26) \quad ATL_{0,d,r} = 0, \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$(3-27) \quad ATL_{i,d,r} = \min\{ATP_{i,d,r}, ATL_{i-1,d,r} + ATR_{i,d,r}(Y_i - Y_{i-1})\}, \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$(3-28) \quad I_{i,d,r} = \max\{0, (RT_{i,r} - ATL_{i,d,r})\}, \text{ } ^\circ\text{C}$$

3.6.4.1 Parámetro de Impacto de la discontinuidad

Para una discontinuidad dada, el impacto es calculado como:

$$(3-29) \quad IDIS_i = \max\{0, (GRT_i - TDIS)\}, \text{ } ^\circ\text{C}$$

Donde:

$IDIS_i$, es el impacto de la discontinuidad en el año i , $^\circ\text{C}$;

$TDIS$, es la temperatura que resulta tolerable, sin riegos significativos de discontinuidad, °C;
 GRT_i , es la temperatura global media alcanzada en el año i , °C.

3.6.5 Estimación del daño

El daño regional es estimado con frecuencia como el por ciento de pérdida del PIB que corresponde a la duplicación de la concentración de CO₂. En el modelo PAGE2002, el PIB regional ($GDP_{i,r}$) se calcula para cada período de análisis, en millones de dólares estadounidenses, mediante la expresión:

$$(3-30) \quad GDP_{i,r} = GDP_{i-1,r} \left(\frac{1 + GRW_{i,r}}{100} \right)^{Y_i - Y_{i-1}}, \text{ M\$}$$

Donde: $GRW_{i,r}$ es la tasa de crecimiento del PIB.

Los pesos son utilizados para monetizar los impactos y así permitir la comparación y agregación de los sectores económicos y no-económicos. En específico, el peso $W_{d,r}$ expresa el por ciento de pérdida de PIB para un calentamiento de 2,5 °C en cada sector y región de impacto:

$$(3-31) \quad W_{d,r} = \frac{W_{d,0} WF_r}{100}, \text{ para } 2,5 \text{ °C}$$

En esta expresión, $W_{d,0}$ es el valor de $W_{d,r}$ para la región de referencia y WF_r es el multiplicador regional.

Sin embargo, para una discontinuidad, el peso regional no debe exceder al 100% del PIB, de modo que:

$$(3-32) \quad WDIS_r = \min \left\{ 100, \frac{WDIS_0 WF_r}{100} \right\}$$

Donde: $WDIS_r$ es la pérdida del PIB si ocurre una discontinuidad.

El modelo PAGE2002 calcula el daño basado en el incremento de la temperatura. El impacto es calculado para cada región, sector y período como función del incremento de la temperatura regional por encima de un nivel tolerable. Una política de adaptación, caracterizada por el parámetro $IMP_{i,d,r}$ puede mitigar este impacto.

El impacto ponderado $WI_{i,d,r}$ se estima como:

$$(3-33) \quad WI_{i,d,r} = \left(\frac{I_{i,d,r}}{2.5} \right)^{POW} W_{d,r} \left(1 - \frac{IMP_{i,d,r}}{100} \right) GDP_{i,r}, \text{ M\$}$$

Donde:

POW , es el exponente de la función de impacto;

$IMP_{i,d,r}$, representa el por ciento de reducción en los impactos como consecuencia de la adaptación en el año i para la región r , en el sector d , %.

El impacto ponderado para una discontinuidad $WIDIS_{i,r}$ se calcula como

$$(3-34) \quad WIDIS_{i,r} = IDIS_i \frac{PDIS}{100} WDIS_r GDP_{i,r}, \text{ M\$}$$

Donde:

$IDIS_i$, es el impacto de la discontinuidad en al año i , °C;

$PDIS$, es la probabilidad de que ocurra una discontinuidad, %/°C.

Así, el impacto total ponderado $WIT_{i,r}$ se calcula como:

$$(3-35) \quad WIT_{i,r} = \sum_d WI_{i,d,r} + WIDIS_{i,r}, \text{ M\$}$$

El daño agregado $AD_{i,r}$ se calcula como:

$$(3-36) \quad AD_{i,r} = WIT_{i,r} (Yhi_i - Ylo_i), \text{ M\$}$$

Donde:

Yhi_i , es el año final del período de análisis, años.

Ylo_i , es el año inicial del período de análisis, años.

$$(3-37) \quad Yhi_{10} = Y_{10}$$

$$(3-38) \quad Yhi_i = \frac{(Y_i + Y_{i+1})}{2}, \text{ para } i = 1 \text{ a } 9$$

$$(3-39) \quad Ylo_1 = Y_0$$

$$(3-40) \quad Ylo_i = \frac{(Y_i + Y_{i-1})}{2}, \text{ para } i = 2 \text{ a } 10$$

Como cada año de análisis es en realidad, representativo de un período, se toma como año inicial un valor intermedio entre dicho año y el anterior y como año final un valor intermedio entre dicho año y el siguiente.

El modelo tiene en cuenta tasas de descuento que varían en el tiempo de manera diferente para cada región. Los impactos ponderados son agregados utilizando tasas de descuento variables en el tiempo representadas por $dr_{i,r} * ric$ y sumados en todas las regiones y sectores, incluyendo una posible discontinuidad, para estimar el valor presente neto, de esta forma el daño descontado DD , se calcula por la siguiente expresión:

$$(3-41) \quad DD = \sum_{i,r} (AD_{i,r}) \prod_{k=1}^i \left(1 + dr_{k,r} \frac{ric}{100} \right)^{-(Y_k - Y_{k-1})}, \text{ M\$}$$

Donde:

$dr_{i,r}$, es la tasa de descuento en el año i para la región r , %/año;

ric , multiplicador para la tasa de descuento del impacto.

3.6.6 Costos de adaptación

La adaptación puede incrementar el nivel tolerable de incremento de la temperatura y es también capaz de mitigar los impactos del cambio climático. Los costos involucrados en la adaptación al cambio climático se utilizaron para estimar los parámetros con incertidumbres de costos de adaptación para la región de referencia $CS_{d,0}$, $CP_{d,0}$ y $CI_{d,0}$. Los factores de costos de adaptación para las otras regiones se asumen proporcionales a los de la región de referencia mediante el factor CF_r .

$$(3-42) \quad CS_{d,r} = CS_{d,0}CF_r, \text{ M\$-déc/}^\circ\text{C}$$

$$(3-43) \quad CP_{d,r} = CP_{d,0}CF_r, \text{ M\$/}^\circ\text{C}$$

$$(3-44) \quad CI_{d,r} = CI_{d,0}CF_r, \text{ M\$/\%}$$

Donde:

CS , Costo de adaptación a la tasa tolerable de cambio;

CI , Costo de la adaptación al impacto;

CP , Costos de adaptación al nivel tolerable de cambio.

El costo total de adaptación, $AC_{i,d,r}$, se calcula mediante la siguiente expresión:

$$(3-45) \quad AC_{i,d,r} = CS_{d,r}SLOPE_{i,d,r} + CP_{d,r}PLAT_{i,d,r} + CI_{d,r}IMP_{i,d,r}, \text{ M\$}$$

Los costos de adaptación son agregados y descontados en el tiempo de la misma forma que el impacto del cambio climático, utilizando una tasa de descuento para el costo, que se denota por $dr_{i,r}$.

$$(3-46) \quad AAC_{i,d,r} = AC_{i,d,r}(Yhi_i - Ylo_i), \text{ M\$}$$

$$(3-47) \quad DAC = \sum_{i,d,r} (AAC_{i,d,r}) \prod_{k=1}^i \left(1 + \frac{dr_{k,r}}{100}\right)^{-(Y_k - Y_{k-1})}, \text{ M\$}$$

Donde:

$AAC_{i,d,r}$, es el costo de adaptación agregado;

$DAC_{i,d,r}$, es el costo de adaptación descontado.

3.6.7 Costos de adaptación preventiva

Las emisiones BAU corresponden a un escenario donde no se realizan acciones, por lo que no hay costos en las políticas de prevención. Estas emisiones son ajustadas mediante el parámetro con incertidumbre $EMIT_{g,r}$ para modelar las incertidumbres sobre el crecimiento económico futuro, así como las derivadas de cambios de política u otros comportamientos no

previstos. Esto se modela mediante la siguiente expresión, que determina como la incertidumbre asociada a las emisiones BAU se incrementa con el tiempo.

$$(3-48) \quad ZC_{i,g,r} = \left(1 + \frac{EMIT_{g,r}}{100} \frac{Y_i - Y_0}{Y_{10} - Y_0} \right) BAU_{i,g,r}, \%$$

Donde:

$BAU_{i,g,r}$, es el por ciento que representan las emisiones de un escenario BAU con respecto al año base, %;

$ZC_{i,g,r}$, es el por ciento que representan las emisiones en un escenario sin costos de prevención con relación al año base, %.

Los costos de prevención dependen del por ciento de reducción para el cual las emisiones de GEI en cada región, $ER_{i,g,r}$, caen por debajo del nivel de emisiones a cero-costo, $ZC_{i,g,r}$. Una vez que la reducción se realiza, se asume que no pueden deshacerse. Para el primer año de análisis:

$$(3-49) \quad CB_{1,g,r} = \max\{0, (ZC_{1,g,r} - ER_{1,g,r})\}, \%$$

$$(3-50) \quad CB_{i,g,r} = \max\{CB_{i-1,g,r}, (ZC_{i,g,r} - ER_{i,g,r})\}, \%$$

Donde $CB_{i,g,r}$ es la reducción de emisiones con respecto al año base, %.

Se emplean tres parámetros con incertidumbre para modelar los costos de prevención: 1) $CL_{g,r}$, representa el costo de la medida de control más barata, 2) $MAX_{g,r}$, es a su vez la máxima reducción que puede ser lograda con la medida de control más barata y 3) $CH_{g,r}$, representa los costos adicionales en M\$/Mton por reducciones superiores a $MAX_{g,r}$. Los parámetros de costos para otras regiones son proporcionales a los de la región de referencia mediante un factor de multiplicación regional de costos de prevención, CPF .

$$(3-51) \quad CL_{g,r} = CL_{g,0} CPF_r, \quad \text{M\$/Mton}$$

$$(3-52) \quad CH_{g,r} = CH_{g,0} \cdot CPF_r, \quad \text{M\$/Mton}$$

Los costos de prevención para el contaminante g , en el año de análisis i y en la región r , se calculan como:

$$(3-53) \quad PC_{i,g,r} = \begin{cases} \left(\frac{CL_{g,r} MAX_{g,r}}{100} + CL_{g,r} \frac{CB_{i,g,r} - MAX_{g,r}}{100} \right) E_{0,g,r} & \text{si } (CB_{i,g,r} \leq MAX_{g,r}) \\ \left(\frac{CL_{g,r} MAX_{g,r}}{100} + (CL_{g,r} + CH_{g,r}) \frac{CB_{i,g,r} - MAX_{g,r}}{100} \right) E_{0,g,r} & \text{si } (CB_{i,g,r} > MAX_{g,r}) \end{cases}, \text{M\$}$$

Los costos de prevención son agregados ($APC_{i,d,r}$) y descontados (DPC) en el tiempo, siguiendo un procedimiento análogo al de los costos de adaptación.

$$(3-54) \quad APC_{i,d,r} = PC_{i,d,r} (Yhi_i - Ylo_i), \text{ M\$}$$

$$(3-55) \quad DPC = \sum_{i,d,r} (APC_{i,d,r}) \prod_{k=1}^i \left(1 + \frac{dr_{k,r}}{100} \right)^{-(Y_k - Y_{k-1})}, \text{ M\$}$$

El PAGE2002 solamente incluye los costos directos de prevención de las emisiones de GEI. El modelo no tiene en cuenta los beneficios secundarios de la reducción, por lo que subestima los efectos positivos de la prevención de GEI.

3.7. Incertidumbres

Cada parámetro con incertidumbre incluido en el modelo es representado como una distribución de probabilidad triangular a través de sus mínimos, modas y máximos. El modelo PAGE2002 cuenta con alrededor de 80 parámetros con incertidumbre de entrada. El número exacto depende de la región y los sectores de impacto usados en una corrida. Una corrida completa del modelo requiere estimaciones repetidas para las salidas fundamentales: calentamiento global en el tiempo, daño y costos de adaptación y prevención.

El muestreo Hipercubo Latino es usado para el tratamiento de las incertidumbres. Se emplea como técnica de muestreo en el método de Monte Carlo para mejorar el rango de cobertura de los parámetros de entrada con respecto al método tradicional de muestreo aleatorio y por tanto generar resultados más precisos y de forma más eficiente.

3.8. Salidas del Modelo PAGE2002

En el modelo PAGE los resultados se dan por regiones y por años. Los impactos son expresados además por sectores (económico y no económico). Los resultados son mostrados en diferentes hojas del libro:

Hoja Emisiones:

- A partir de la metodología descrita el modelo calcula y presenta en forma gráfica los escenarios de emisiones totales hasta el 2200 para los contaminantes considerados (CO₂, CH₄, SF₆).

Hoja Clima:

- Concentraciones y forzamientos radiativos por años para los contaminantes considerados, incluido el forzamiento por aerosoles de sulfatos.
- Temperatura de equilibrio, incrementos de temperatura y temperatura media global para todo el período de estudio.

Hoja Impactos:

- El nivel tolerable y la tasa tolerable de cambio en la temperatura, nivel tolerable y la tasa tolerable ajustadas de acuerdo con la política de adaptación para todo el período.
- Impacto regional del calentamiento global por años.
- Impacto de la discontinuidad por años.
- Impacto total ponderado.

- Impacto total agregado.
- Impacto total descontado.

Hoja Costos de adaptación:

- Costos totales de adaptación.
- Costos de adaptación agregados.
- Costos de adaptación descontados.

Hoja Costos de adaptación preventiva:

- Costos totales de prevención.
- Costos de prevención agregados.
- Costos de prevención descontados.

Hoja de totales:

En esta hoja se dan los resultados a partir de comparar dos escenarios de políticas.

Hoja de gráficos:

- Incremento en las concentraciones globales de CO₂.
- Temperaturas medias globales.
- Impacto global.
- Costos globales de adaptación.
- Costos globales de prevención.
- Impacto global y costos.

4. RICE

El modelo RICE, propuesto por William Nordhaus, Universidad de Yale, es la versión del DICE para la estimación económica por regiones de los efectos del cambio climático, permitiendo la evaluación de políticas para su mitigación. Las regiones están formadas atendiendo a condiciones económicas y/o políticas de los países que las integran. El modelo evalúa impactos tangibles e intangibles teniendo en cuenta: agricultura, otros sectores de la economía, regiones costeras, impactos al confort no incluidos en el mercado, salud, asentamientos humanos y ecosistemas; y catástrofes. Los costos no se desagregan por sectores en los resultados.

Posee implementaciones en Excel y GAMS. La última versión disponible es sobre Excel y data del 2001. La versión más actual disponible en GAMS data de 1999. Se plantea que, desde el punto de vista de la exactitud de los resultados, ambas versiones son muy similares. Desde el punto de vista de su uso la versión sobre Excel es más amigable: la obtención de gráficos, tablas y salidas adicionales a partir de los resultados; requiere muy poco esfuerzo y se pueden visualizar las consecuencias de los cambios realizados en variables y parámetros de forma casi inmediata. Por otra parte, la versión en GAMS es más flexible, permitiendo la realización de cambios en el modelo, pero es menos amigable y requiere experiencia en programación y familiarización con el modelo; además si se realizan cambios en variables y parámetros se requiere volver a ejecutar el modelo para obtener los resultados. Ambas versiones emplean métodos diferentes para arribar a la solución.

Las variables en ambas implementaciones pueden clasificarse en “variables y parámetros exógenos”, “variables endógenas”, “variables de control” y “costos o resultados claves”. Las variables y los parámetros exógenos tienen valores fijos o se calculan mediante fórmulas basadas enteramente en otras variables o parámetros exógenos. El valor de las variables endógenas se calcula mediante fórmulas basadas tanto en variables o parámetros exógenos como en variables de control. Las variables de control son determinadas por el usuario; una política implica un conjunto de valores para estas variables. Los costos estimados claves están basados en variables endógenas y en general indican cuando las variables de control tienen un valor óptimo, además de constituir resultados importantes del modelo.

4.1. Especificación regional

Se recolectaron datos para 13 regiones, las cuales se agruparon en ocho a efectos de la modelación en RICE99. Las regiones agrupan países de similares condiciones políticas y/o económicas. El siguiente cuadro muestra las regiones y los países que las integran.

Cuadro 3
REGIONES EN RICE

Siglas	Países
EUA	Estados Unidos de América
OHI	Otros países de elevados ingresos (Japón y Canadá, entre otros. Se incluyen algunas islas de las Antillas: las Islas Vírgenes Británicas y Estadounidenses, las Bahamas y Aruba).
OECD–Europa	Países de Europa pertenecientes a la Organización para la Cooperación Económica y el Desarrollo (OECD, por sus siglas en inglés)
R&EE	Rusia y Europa del Este.
MI	Países de ingresos medios (de América Central y el Caribe incluye: Puerto Rico, Trinidad y Tobago, las Antillas Holandesas, Surinam, Martinica, Antigua y Barbuda, Barbados, Monserrate, Saint Kitts y Nevis, Islas Turcas y Caicos, Santa Lucía, y Anguilla).
LMI	Países de ingresos medios–bajos (de América Central y el Caribe incluye: México, Cuba, República Dominicana, Jamaica, Costa Rica, Panamá, El Salvador, Guadalupe, Belice, Islas Caimanes, San Vicente y las Granadinas y Dominica) .
CH	China
LI	Países de bajos ingresos (de América Central y el Caribe incluye: Honduras, Guatemala, Nicaragua y Haití).

Fuente: Nordhaus y Boyer, 1999, capítulo 3.

4.2. Especificación temporal

El modelo maneja períodos de 10 años. Todas las variables de flujo se reportan como flujos al año mientras que los acumulados se determinan al inicio del período.

4.3. Contaminantes

El modelo sólo considera como endógeno el CO₂ proveniente de fuentes industriales. Las emisiones de CO₂ como resultado de cambios en el uso de la tierra, así como las correspondientes a los restantes GEI y aerosoles de sulfato, son consideradas exógenas y sus efectos se evalúan de manera conjunta en un término único, proyectado según los análisis del IPCC y otras consideraciones.

4.4. Metodología

4.4.1 Descripción general

El modelo RICE constituye una extensión del modelo teórico de crecimiento económico de Ramsey, (Ramsey, 1928 y Koopmans, 1967) para incluir adicionalmente las llamadas inversiones climáticas, resultado de las políticas que se sigan con respecto al medio ambiente. Las reducciones de las emisiones en el modelo extendido se expresan de manera análoga a las inversiones que considera el modelo original. En consecuencia, las concentraciones de GEI representan un “capital negativo” y las reducciones de las emisiones de dichos gases constituyen una disminución de este capital negativo. De esta forma, las reducciones de las emisiones que se logran mediante sacrificios en el consumo, previenen un cambio climático económicamente

perjudicial, disminuyen ese capital negativo y, consecuentemente, aumentan las posibilidades de consumo en el futuro.

Se asume que cada región posee un conjunto de preferencias bien definido, el cual se representa mediante una “función de bienestar social”, la cual determina las opciones en el consumo y la inversión. La función de bienestar social se incrementa en la medida que aumenta el consumo per cápita de cada generación, tendencia que se acompaña de un decremento en la utilidad marginal de consumo. La importancia relativa entre generaciones ha sido considerada mediante una tasa de preferencia temporal pura, que favorece a las generaciones actuales con respecto a las venideras.

Como parte de la evaluación, la función de bienestar social de cada región es maximizada, mediante un proceso sujeto a las restricciones económicas y geofísicas que correspondan.

El modelo sintetiza el consumo de cada región y lo reduce a la producción de un único artículo equivalente, el cual se considera tanto para el consumo como para la inversión. Todos los cambios en el bienestar, incluyendo los que se deben al cambio climático, son reflejados en la definición de consumo de este artículo, que representa un “consumo generalizado”. No se considera el comercio de bienes o capital excepto en el caso del intercambio de bonos de carbono.² A cada región se le asigna una cantidad inicial de capital y fuerza laboral, así como un nivel tecnológico dado. El crecimiento poblacional y los cambios tecnológicos son exógenos mientras que la acumulación de capital se determina optimizando el flujo del consumo en el tiempo.

Se define la “energía del carbono”, como un nuevo factor en el Producto Interno Bruto (PIB). La misma se asocia a los servicios energéticos que se derivan del consumo de combustible fósil y está determinada por el contenido de carbono de todo el combustible fósil consumido. Así, en la “energía del carbono” se considera toda la energía obtenida a partir de los diferentes tipos de combustible fósil, ponderando de acuerdo con el contenido de carbono de los mismos.

El PIB sigue la forma funcional Cobb–Douglas, con rendimientos constantes a escala: en el capital, la fuerza laboral y la energía del carbono. Los cambios tecnológicos son de dos tipos: los que se refieren a la economía en general y los que representan una disminución de carbono. Los primeros son neutrales tipo Hicks mientras que los segundos se modelan como una reducción en la proporción de emisiones de CO₂ como parte de la entrada denominada energía del carbono. Por conveniencia, tanto la energía del carbono como las emisiones industriales se miden en unidades de carbono.

Los parámetros relacionados con la energía se obtuvieron a partir de datos de uso y costos de la energía y elasticidades en su precio, lo cual conduce a una curva de reducción de carbono con basamento empírico. Por otra parte, la curva de suministro de combustible fósil es tal que contempla la existencia de una cantidad limitada del mismo que, aunque resulta enorme, está disponible a costos crecientes debido al aumento de la escasez (rentas de Hotelling).

² En la descripción del modelo se sigue el convenio de denominar emisiones de carbono a las emisiones de dióxido de carbono.

Para estimar los flujos de carbono, el modelo emplea un enfoque estructural mediante la aplicación a los ciclos de carbono existentes de un modelo de tres reservorios: atmósfera, biosfera/superficie oceánica y océanos profundos.

El cambio climático está representado por la temperatura global en la superficie. En la estimación de los impactos, las áreas potenciales de riesgo se dividen en categorías.

4.4.2 Ecuaciones fundamentales

La función objetivo o criterio W_J a ser maximizada para la región J se determina según:

$$(4-1) \quad W_J = \sum_t U[c_J(t), L_J(t)] R(t), \text{ Unidades de utilidad}$$

$U[c_J(t), L_J(t)]$ es la utilidad del consumo para la región J , $c_J(t)$ es el flujo del consumo per cápita durante el período t , $L_J(t)$ es la población y $R(t)$ es el factor de descuento de preferencia temporal pura.

La utilidad se descuenta mediante el factor $R(t)$, que representa la preferencia social entre diferentes generaciones como función del tiempo. La tasa de preferencia temporal pura $\rho(t)$, que subyace bajo $R(t)$ es un parámetro importante en este enfoque. Se asume que la misma decrece con el tiempo: 3% anual en 1995, 2,3% en el 2100 y 1,8 % en el 2200. El término $R(t)$ viene dado por:

$$(4-2) \quad R(t) = \prod_{v=0}^t [1 + \rho(v)]^{-10}$$

Por su parte, la función de utilidad puede representarse en la forma general:

$$(4-3) \quad U[c_J(t), L_J(t)] = L_J(t) \{c_J(t)^{1-\alpha} - 1\} / (1 - \alpha), \text{ Unidades de utilidad}$$

Donde el parámetro α es una medida del valor social de los diferentes niveles de consumo y tiene varias interpretaciones, pudiendo representar tanto la curvatura de la función de utilidad, como la elasticidad de la utilidad marginal del consumo o la tasa de aversión a la desigualdad. Operacionalmente mide el grado hasta el cual una región está dispuesta a reducir el bienestar de generaciones actuales de alto consumo para mejorar el bienestar de generaciones futuras de bajo consumo. En los modelos RICE y DICE se toma el límite $\alpha \rightarrow 1$, lo que lleva a la función de utilidad logarítmica:

$$(4-4) \quad U[c_J(t), L_J(t)] = L_J(t) \{\log[c_J(t)]\}, \text{ Unidades de utilidad}$$

Se asume además que la tasa de crecimiento de la población se reduce de forma exponencial inversa tendiendo a cero, de modo que la población va creciendo cada vez menos hasta alcanzar un valor estable de 11.500 millones de personas. En específico, sea $g_J^{pop}(t)$ la tasa de crecimiento de la población en la región J para el período t , $g_J^{pop}(0)$ la tasa de crecimiento de

la población en la región J para el primer período y δ_J^{pop} la tasa de decrecimiento constante de $g_J^{pop}(t)$, se tiene que la tasa de crecimiento de la población para cada década viene dada por:

$$(4-5) \quad g_J^{pop}(t) = g_J^{pop}(0) \exp(-\delta_J^{pop} * t), \text{ tasa/déc}$$

Y la población de la región J en el período t viene dada por:

$$(4-6) \quad L_J(t) = L_J(0) \exp\left(\int_0^t g_J^{pop}(t) dt\right), \text{ Millones de personas}$$

El PIB $Q_J(t)$, se evalúa mediante una modificación de la función de Cobb–Douglas con rendimientos constantes a escala en el capital $K_J(t)$, la fuerza laboral $L_J(t)$ ³ y la energía del carbono $ES_J(t)$. Las emisiones de carbono están relacionadas con los servicios de energía mediante una función de índice de eficiencia. Esta función varía en el tiempo para reflejar los cambios tecnológicos que representan una disminución de carbono.

$$(4-7) \quad Q_J(t) = \Omega_J(t) \{A_J(t) K_J(t)^\gamma L_J(t)^{1-\beta_J-\gamma} ES_J(t)^{\beta_J} - c_J^E(t) ES_J(t)\}, \text{ T\$}_{1990/\text{año}}$$

Aquí γ es la elasticidad del PIB con respecto al capital y se asume que es 0.3. β_J es la elasticidad del PIB con respecto a los servicios de energía y el término $(1 - \beta_J - \gamma)$ es la elasticidad del PIB respecto de la fuerza laboral. El término $A_J(t)$ es la Productividad Total de Factores (*PTF*; *TFP* en inglés) y en él se considera el nivel de cambios tecnológicos neutrales tipo Hick. El término $\Omega_J(t)$ es un coeficiente de daño que relaciona el impacto del cambio climático en el PIB. El término $[c_J^E(t) ES_J(t)]$ sustrae del PIB los costos de producir energía a partir de combustible fósil. $c_J^E(t)$ es el costo por unidad de carbono en la región J .

La relación entre la energía del carbono y los servicios de energía para cada región J , $E_J(t)$, viene dada por:

$$(4-8) \quad ES_J(t) = \varsigma_J(t) E_J(t), \text{ Gton_C/año}$$

Los cambios tecnológicos en el sector de la energía incrementan los niveles de carbono totales, pero de modo que se puedan extraer más servicios de energía por unidad de energía del carbono consumido. El término $\varsigma_J(t)$ representa el nivel tecnológico correspondiente.

Una de las mayores incertidumbres del modelo es la proyección futura de la *PTF*: se asume que el crecimiento de la *PTF* disminuye gradualmente en los próximos tres siglos hasta detenerse eventualmente, de modo que se alcanza una *PTF* constante para cada región J . Para considerar esto, se modela el comportamiento de la tasa de crecimiento de la *PTF* como una

³ La fuerza laboral se asume igual a la población; el coeficiente de proporcionalidad entre ambas forma parte de la constante de proporcionalidad global $A_J(t)$

exponencial inversa similar a la usada para la tasa de crecimiento poblacional. Si $g_J^A(t)$ es la tasa de crecimiento de $A_J(t)$, se tiene que:

$$(4-9) \quad g_J^A(t) = g_J^A(0) \exp(-\delta_J^A * t), \text{ tasa/déc}$$

Y la *PTF* viene dada por:

$$A_J(t) = A_J(0) \exp\left(\int_0^t g_J^A(t) dt\right)$$

Donde δ_J^A se selecciona de forma tal que $A_J(t)$ tienda asintóticamente al valor de *PTF* asumido para la región J ($A_J^*(t)$).

Para una economía cerrada se tiene que $Q_J(t)$ es igual a $C_J(t) + I_J(t)$ donde $C_J(t)$ e $I_J(t)$ son el consumo y la inversión respectivamente. Considerando, adicionalmente, el comercio de bonos de emisiones, dicha igualdad se modifica y se transforma en la expresión:

$$(4-10) \quad Q_J(t) + \tau_J(t)[\Pi_J(t) - E_J(t)] = C_J(t) + I_J(t), \text{ T\$}_{1990}/\text{año}$$

Donde $\Pi_J(t)$ es la cantidad de emisiones de carbono permitidas, según la cuota asignada a la región J y $\tau_J(t)$ es el precio de cada bono de emisión. El término $\tau_J(t)[\Pi_J(t) - E_J(t)]$ representa entonces los ingresos netos que recibe una región por la compraventa de bonos. Si sus emisiones exceden la cantidad permitida debe comprar más bonos que los que vende y sus ingresos netos por este concepto son negativos. $\tau_J(t)$ actúa como un impuesto al carbono y puede ser interpretado además como el precio de mercado de los bonos de emisiones.

La definición del consumo per cápita viene dada por:

$$(4-11) \quad c_J(t) = C_J(t) / L_J(t), \text{ M\$}/\text{persona-año}$$

La evolución de las existencias de capital se expresa como:

$$(4-12) \quad K_J(t) = K_J(t-1)(1 - \delta_K)^{10} + 10 * I_J(t-1), \text{ T\$}_{1990}$$

Donde δ_K es la tasa anual de depreciación de las existencias de capital (se asume un 10%).

El costo de la energía del carbono es:

$$(4-13) \quad c_J^E(t) = q(t) + Markup_J^E(t), 10^3 \text{ \$}/\text{ton}$$

Donde $q(t)$ es el precio al por mayor de la energía del carbono exclusivo de las rentas de Hotelling, y $Markup_j^E(t)$ es un encarecimiento en los costos de la energía. Se asume que el precio al por mayor es el mismo en diferentes regiones mientras que el $Markup_j^E(t)$ incluye las diferencias de precio entre regiones debidos al transporte, los costos de distribución y los impuestos nacionales a la energía y se asume constante en el tiempo, es decir, la dependencia temporal se desprecia. Los impuestos a la energía se interpretan como impuestos pigouvianos que reflejan los costos externos de la producción y el consumo de la energía. El costo de la energía del carbono en la ecuación (4-13) no depende de $\varsigma_j(t)$ ya que el modelo considera que los cambios tecnológicos que disminuyen la cantidad de carbono por unidad de energía no provocan un incremento en la producción.

El uso acumulativo de la energía del carbono se define como:

$$(4-14) \quad CumC(t) = CumC(t-1) + 10 * E(t), \text{ Gton_C}$$

Donde $CumC(t)$ es el consumo acumulativo de energía del carbono al final del período t y $E(t)$ es el uso global de energía del carbono en el mismo período. $E(t)$ es la suma del uso de la energía del carbono para todas las regiones.

La curva de suministro de la energía de carbono viene dada por:

$$(4-15) \quad q(t) = \xi_1 + \xi_2 [CumC(t) / CumC^*]^{\xi_3}, 10^3 \text{ \$/ton_C}$$

Donde $CumC^*$ representa el punto de inflexión más allá del cual el costo marginal de la energía del carbono comienza a aumentar bruscamente. Los valores ξ_i son parámetros.

La acumulación y transporte de CO_2 en el modelo se realiza mediante tres reservorios: la atmósfera, un reservorio de mezclado rápido en la región superficial de los océanos y la biosfera y los océanos profundos, los cuales a largo plazo proveen un sumidero finito para el carbono. Se asume que cada reservorio está bien mezclado a corto plazo. El carbono fluye en ambas direcciones entre reservorios adyacentes; el proceso de mezclado entre el reservorio biosfera/océanos superficiales y los océanos profundos es muy lento. Se asume que la acumulación y transporte de CO_2 puede ser representada mediante el siguiente sistema lineal:

$$(4-16) \quad M_{AT}(t) = 10 * ET(t) + \phi_{11} M_{AT}(t-1) - \phi_{12} M_{AT}(t-1) + \phi_{21} M_{UP}(t-1), \text{ Gton_C}$$

$$(4-17) \quad M_{UP}(t) = \phi_{22} M_{UP}(t-1) + \phi_{12} M_{AT}(t-1) - \phi_{21} M_{UP}(t-1) + \phi_{32} M_{LO}(t-1) - \phi_{23} M_{UP}(t-1), \text{ Gton_C}$$

$$(4-18) \quad M_{LO}(t) = \phi_{33} M_{LO}(t-1) - \phi_{32} M_{LO}(t-1) + \phi_{23} M_{UP}(t-1), \text{ Gton_C}$$

Donde $M_{AT}(t)$ es la masa de carbono en la atmósfera al final del período, $M_{UP}(t)$ es la masa de carbono en el reservorio superior (biosfera y zona superficial de los océanos), $M_{LO}(t)$ es

la masa de carbono en las profundidades oceánicas y $ET(t)$ son las emisiones globales de CO_2 incluyendo las provenientes de cambios en el uso de la tierra. Los coeficientes ϕ_{ij} son las tasas de transferencia del reservorio i al j (para el período) donde i y $j = AT, UP$ y LO .

La relación entre la acumulación de GEI y el incremento en el forzamiento radiactivo viene dada por:

$$(4-19) \quad F(t) = \eta \left\{ \log \left[M_{AT}(t) / M_{AT}^{PI} \right] / \log(2) \right\} + O(t), \text{ W/m}^2$$

Donde $F(t)$ es el incremento en el forzamiento radiactivo desde 1990. El término $O(t)$ es un parámetro exógeno que representa el forzamiento provocado por otros GEI incluyendo los efectos de los aerosoles. El término M_{AT}^{PI} es la concentración de CO_2 en la época preindustrial. El modelo permite estimar el incremento en la temperatura global, $T(t)$, con respecto a los valores promedios para las diferentes estaciones del año, en la atmósfera y en las capas oceánicas superficiales, desde 1990, mediante la expresión:

$$(4-20) \quad T(t) = T(t-1) + \sigma_1 \{ F(t) - \lambda T(t-1) - \sigma_2 [T(t-1) - T_{LO}(t-1)] \}, ^\circ\text{C}$$

Aquí λ es un parámetro y los σ_i son coeficientes de transferencia que reflejan las tasas de flujos y las capacidades caloríficas de los diferentes sumideros. El término $T_{LO}(t)$ es el incremento de la temperatura en las profundidades oceánicas y viene dado por:

$$(4-21) \quad T_{LO}(t) = T_{LO}(t-1) + \sigma_3 [T(t-1) - T_{LO}(t-1)], ^\circ\text{C}$$

La relación entre el incremento en la temperatura global y la pérdida de ingresos viene dada por:

$$(4-22) \quad D_J(t) = \chi_{1,J} T(t) + \chi_{2,J} T(t)^2$$

Donde $D_J(t)$ es el daño proveniente del cambio climático en la región J asociado a un cambio en la temperatura promedio global, y los $\chi_{i,J}$ son los coeficientes que relacionan la función de daño con la temperatura. El coeficiente $\Omega(t)$ de la ecuación (4-7) está relacionado con $D_J(t)$:

$$(4-23) \quad \Omega(t) = 1 / [1 + D_J(t)]$$

4.4.3 Valoración de los impactos

Para la estimación de los impactos, las áreas potenciales de riesgo se dividen en siete categorías:

- 1) Agricultura
- 2) Elevación del nivel del mar

- 3) Otros sectores de mercado
- 4) Salud
- 5) Impactos al confort no incluidos en el mercado (Non-market amenity impacts)
- 6) Asentamientos humanos y ecosistemas
- 7) Catástrofes

Se considera que hay adaptación, lo cual disminuye en alguna medida los costos, en particular para la agricultura. Esta no se modela explícitamente pero se considera en las funciones de daño.

La metodología para la estimación de los impactos es la siguiente:

Sea $\theta_{ij}(T, y_j)$ el índice de impacto para el sector i en la subregión j , correspondiente a un incremento de temperatura T y a un ingreso per cápita y_i . Este índice de impacto es la fracción del PIB que la subregión j estará dispuesta a pagar para evitar las consecuencias en el sector i de un incremento de la temperatura en T °C. Para determinar el impacto del calentamiento en un año futuro dado, se asume que el índice de impacto futuro toma la forma:

$$(4-24) \quad \theta_{ij}(T, y_j) = Q_{ij}(T) [y_j(t) / y_j(1995)]^{\eta_i}$$

O sea, el índice de impacto es el producto de una función de la temperatura por un ajuste en el ingreso. Este ajuste es la fracción del PIB per cápita respecto del que existía en el año 1995, elevada al exponente η_i , donde η_i es la elasticidad del ingreso en el índice de impacto.

Para construir los índices de impacto $\theta_{ij}(T, y_j)$ para cada categoría de daño y subregión, los autores del modelo usaron la información disponible y estimaron su valor para un incremento en la temperatura de 2,5 °C, es decir $\theta_{ij}(2.5, y_j)$. Seguidamente estimaron el valor de η . Finalmente, plantearon las funciones necesarias para evaluar $\theta_{ij}(T, y_j)$ a otras temperaturas a través de $Q_{ij}(T)$. Las funciones $Q_{ij}(T)$ empleadas para cada categoría de daño son las que aparecen en los subepígrafes siguientes.

4.4.3.1 Agricultura

La función de daño en la agricultura para la subregión j viene dada por:

$$(4-25) \quad Q_{ag,j}(T) = \left\{ \alpha_{ag}^0 + \alpha_{ag}^1 (T + T_j^0) + \alpha_{ag}^2 (T + T_j^0)^2 \right\} - \left\{ \alpha_{ag}^0 + \alpha_{ag}^1 T_j^0 + \alpha_{ag}^2 T_j^{02} \right\} + \varepsilon_{ag,j}$$

Donde α_{ag}^i son los coeficientes constantes de la expresión, T_j^0 es la temperatura promedio subregional en ausencia de cambio climático y $\varepsilon_{ag,j}$ representa el error de la estimación para la subregión j . Se asume $\varepsilon_{ag,j} = 0$ para las subregiones: Europa del Este, países de ingresos medios, países de ingresos medios bajos, África y países de ingresos bajos.

4.4.3.2 Otros sectores de mercado

Los daños a otros sectores vulnerables del mercado tienen una fuerte dependencia de la temperatura subregional. Ellos resultan nulos para temperaturas por debajo de 12,3 °C. En este caso, la modelación de la función de daño sigue la misma metodología que se emplea en el caso de la agricultura.

4.4.3.3 Regiones costeras

La vulnerabilidad de las costas no está relacionada con el clima subregional sino con los procesos globales. En el modelo se asume la siguiente relación:

$$(4-26) \quad Q_{coastal,j}(T) = \alpha_{coastal,j} [T / 2.5]^{1.5}$$

4.4.3.4 Impactos al confort no incluidos en el mercado

Los estimados para estos impactos están basados en una relación cuadrática entre el daño y la temperatura subregional. La metodología seguida es la misma que se emplea en el caso de la agricultura.

4.4.3.5 Salud

Los estimados para el impacto climático en la salud dependen fuertemente de la temperatura. Se estima que el impacto es nulo hasta que la temperatura promedio subregional no alcanza un valor superior a los 15 °C pero a partir de este punto los impactos comienzan a aumentar abruptamente. Esto se simula mediante la relación:

$$(4-27) \quad Q_{health,j}(T_j) = 0.002721(T_j)^{0.2243}$$

4.4.3.6 Asentamientos humanos y ecosistemas

Los estimados para estos impactos están basados en cambios de la temperatura global. La metodología seguida es la misma empleada para los impactos en zonas costeras.

4.4.3.7 Catástrofes

La función de daño para catástrofes se asume lineal para cambios de temperaturas de hasta 3 °C. Por encima de este límite se considera que sigue una función potencial.

4.4.4 Función de daño

Para obtener la forma de la función de daño $D_j(t)$ los autores del modelo siguieron los siguientes pasos:

- Calcular los impactos regionales para 2,5 °C y 6 °C, o sea $\theta_{ij}(2.5, y_j(2100))$ y $\theta_{ij}(6, y_j(2100))$. El término $y_j(2100)$ fue tomado de una corrida de RICE-98.
- Sumar estos para todas las categorías de daño hasta crear índices de impacto de conjunto para cada subregión y obtener los agregados subregionales $\theta_j(2.5, y_j(2100))$ y $\theta_j(6, y_j(2100))$.
- Resolver un sistema de dos ecuaciones cuadráticas para cada región con el objetivo de obtener los coeficientes de daño para la función de daño cuadrática
- (4-22) empleando los resultados para 0 °C, 2,5 °C y 6 °C. Para las regiones que contienen más de 13 subregiones, se ponderan las subregiones atendiendo al PIB.

4.5. Variables en el modelo

A continuación se señalan las principales variables del modelo.

4.5.1 Variables y parámetros exógenos

Las variables y parámetros exógenos, es decir, aquellos que determinan las restricciones económicas y ambientales del modelo, se agrupan en el cuadro 4. Los valores propuestos en el modelo se estimaron a partir de las consideraciones señaladas en 4.5.2.2

4.5.2 Calibración de las variables y parámetros exógenos

4.5.2.1 Datos básicos del año de referencia

- Población. Los datos para los niveles de población iniciales fueron obtenidos de UN Monthly Bulletin of Statistics, July 1996.
- PIB. Los datos fueron tomados de UN Monthly Bulletin of Statistics, July 1996.
- Emisiones industriales de CO₂. Los datos referentes a las emisiones industriales totales de CO₂ fueron obtenidos del Centro de Análisis de la Información del Dióxido de Carbono (CDIAC por sus siglas en inglés) de los Laboratorios Nacionales de Oak Ridge, Departamento de Energía de Estados Unidos.
- Consumo de energía. Los diferentes consumos de energía considerados [Xi] son: consumo no eléctrico de carbón, consumo no eléctrico de gas natural, consumo de electricidad y consumo de productos derivados del petróleo. Los datos del consumo de electricidad fueron tomados de International Energy Annual 1996, publicada por la Administración de Información de la Energía (EIA, por sus siglas en inglés) del Departamento de Energía de Estados Unidos. Las contribuciones de los combustibles fósiles en la electricidad fueron obtenidas usando el Sistema de Proyección de la Energía Mundial de la EIA, versión de 1997. Los datos para el consumo de carbón total y gas natural fueron calculados como la diferencia entre el consumo de electricidad y el consumo total. Los datos de consumo de productos derivados del petróleo fueron bosquejados a partir de International Energy Annual 1995.
- Precios de la energía. Los datos referentes a los precios de la energía eléctrica, los precios de los productos derivados del petróleo, los precios del carbón y los del gas natural fueron obtenidos de la página oficial de la EIA; Energy Prices and Taxes, varios números (publicados por la Agencia Internacional de la Energía de la OECD);

el documento técnico #248 del Banco Mundial, A Survey of Asia's Energy Prices; y varios números de International Energy Annual.

- Elasticidades en los precios. Las elasticidades en los precios de la demanda para todos los componentes de la demanda de energía con respecto a los precios al por menor fueron asumidos como -0.7 en las regiones OECD (EUA, OHI y OECD-Europa) y como 0.84 en el resto del mundo.
- Factores de emisión de carbono. Los coeficientes de carbono para combustibles fósiles individuales y productos derivados del petróleo fueron tomados de varias publicaciones de la EIA del Departamento de Energía de Estados Unidos. El coeficiente de carbono para la electricidad es la suma de los coeficientes de carbono para los combustibles fósiles individuales, ponderados de acuerdo con las contribuciones de cada combustible al consumo de electricidad y ajustados usando la eficiencia de la conversión del combustible fósil en electricidad.

Cuadro 4

VARIABLES Y PARÁMETROS EXÓGENOS

Población
Parámetros que definen la proyección del crecimiento poblacional
Factor de descuento de preferencia temporal pura
Tasa de preferencia temporal pura
Velocidad de crecimiento de la tasa de preferencia temporal pura
Tasa inicial de preferencia temporal pura
Productividad total de factores
Parámetros que definen la proyección de la PTF
Elasticidad del PIB con respecto al capital
Elasticidad del PIB con respecto a la energía del carbono
Proporción entre la energía del carbono y las emisiones de carbono
Parámetros que definen la proyección de la proporción entre la energía del carbono y las emisiones de carbono
Bonos de emisiones industriales de carbono
Tasa de depreciación del capital
Reserva de capital inicial
Encarecimiento regional de los servicios de la energía
Parámetros de la curva de suministro de la energía de carbono
Punto de inflexión de la curva de suministro de la energía de carbono
Tasas de transferencia entre reservorios
Emisiones de carbono provenientes de cambios en el uso de la tierra
Parámetros que definen la proyección de las emisiones de carbono provenientes de cambios en el uso de la tierra
Concentraciones iniciales en los reservorios
Incremento en el forzamiento radiactivo que provoca la duplicación de las concentraciones de CO ₂ con respecto a niveles preindustriales
Concentración de CO ₂ preindustrial
Incremento en el forzamiento radiactivo sobre los niveles preindustriales debido a causas antropogénicas exógenas
Coeficientes de transferencia en la función de la temperatura y parámetro de retroalimentación
Temperatura inicial de la atmósfera
Temperatura inicial de los océanos
Parámetros de la función de daño

Fuente: Nordhaus y Boyer, 1999.

4.5.2.2 *Parámetros de tendencia exógenos*

En esta sección se describen los detalles de la calibración seguida por los autores del modelo para los parámetros exógenos. Estos parámetros gobiernan el crecimiento poblacional, el crecimiento de la PTF y la proporción entre los servicios de carbono y la energía del carbono.

- Estimados empíricos para la población. El modelo usa un modelo exponencial suavizado para el crecimiento poblacional. En esta aproximación el modelo es ajustado exactamente a tres puntos de la trayectoria de población proyectada: el nivel poblacional inicial, el nivel poblacional asintótico y la tasa inicial de crecimiento poblacional. Para niveles intermedios de población y tasa de crecimiento esta técnica conduce a errores de aproximación. El enfoque requiere sólo un pequeño conjunto de parámetros para su especificación. Nótese que para dos regiones cuyas poblaciones se proyecta que disminuyan; OECD-Europa y Japón, en el modelo se introdujeron directamente los datos para los primeros períodos y se inicia el modelo exponencial sólo a partir del momento en que la población empieza a disminuir.
- Fuentes de datos para población. En los primeros cuatro períodos para OECD-Europa y Japón se emplearon las proyecciones de las Naciones Unidas para los años 1995, 2005, 2015 y 2025, tomados de UN World Population Prospects, 1994 Revision. Para el nivel poblacional asintótico (estacionario) se usaron los estimados del Banco Mundial, tomados de World Bank Population Projections, 1994–1995. La tasa inicial de crecimiento poblacional se calculó a partir de World Bank Population Projections, 1994–1995. Para algunas regiones dicha tasa fue modificada hasta hacerla corresponder con las proyecciones del Banco Mundial para el año 2050.
- Estimados de crecimiento productivo a largo plazo. Para el modelo se emplearon las proyecciones para el crecimiento económico obtenidas a partir de una encuesta informal realizada a 10 economistas e historiadores de la economía, los cuales fueron consultados sobre las tendencias de crecimiento económico a largo plazo. Las principales suposiciones en las que se basan estas proyecciones son que las tasas de crecimiento económico por cápita se harán más lentas en las regiones desarrolladas a lo largo del siglo 21 y que las regiones en desarrollo crecerán de acuerdo con tasas que producirán convergencia parcial del crecimiento per cápita para fines del próximo siglo.
- Calibración del modelo para crecimiento económico a largo plazo. Para modelar la tendencia a largo plazo del crecimiento económico, el modelo RICE–99 asume una tendencia exponencial exógena en el progreso tecnológico, similar a lo descrito para la población. La opción para el nivel de productividad inicial [el coeficiente $A_j(0)$ en la función de producción] ya ha sido descrita con anterioridad. La tasa inicial de crecimiento de la productividad fue seleccionada de modo que el crecimiento entre el primero y el segundo período en el PIB per cápita se corresponda con las tasas asumidas. La razón de crecimiento de la PTF decae siguiendo una tasa exponencial para ajustar el nivel asintótico asumido para el PIB per cápita.
- Calibración del cambio tecnológico a tecnologías de reducción de carbono. La calibración de la tasa de descarbonización (la tasa de decaimiento en la intensidad de carbono) se lleva a cabo ajustando los parámetros que rigen el aporte de los servicios

de energía a las emisiones industriales de carbono [$H_J(t)$]. Se asume que $H_J(t)$ crece según una tasa de crecimiento que va disminuyendo de forma similar a la población y a la TFP.

En la visión económica que subyace en el modelo RICE-99 las naciones actúan de manera intencional para acumular capital y mejorar los estándares de vida futuros. Las tasas de ahorro son altas en las regiones de bajos ingresos (con tasas de ahorro brutas que varían de un 25% a un 35% del PIB) y varían entre un 20% y un 25% en las regiones de altos ingresos. Las tasas de ahorro decaen en las décadas venideras a medida que decaen la población y el crecimiento económico.

El retorno sobre el capital es elevado en regiones en vías de desarrollo, lo cual es reflejo de la escasez de capital en esas regiones. El retorno de capital neto en EUA y OECD-Europa se inicia con una tasa histórica de cerca de un 5% por año y luego declina gradualmente a medida que se ralentiza el crecimiento. Las tasas de reingreso de capital en los países en vías de desarrollo parten de valores entre 6% y 7% anuales y decaen a medida que sus economías crecen y acumulan capital.

El PIB per cápita sigue un escenario optimista con poca presencia de grandes guerras, epidemias, depresión o catástrofes ambientales. Se proyecta que el PIB per cápita en las regiones con altos ingresos continúa creciendo con una tasa de cerca de un 1% anual en el próximo siglo mientras que para las regiones de bajos ingresos se proyecta un crecimiento entre un 2% y un 3% anual en el mismo período. Para las regiones de ingresos medios, la proyección es que alcancen los niveles de ingresos per cápita actuales (1999) en EUA para el 2100. Para Europa del Este y los países de ingresos medios bajos, sólo se proyecta alcanzar la mitad de estas cifras. Los países de ingresos bajos y China alcanzarán ingresos per cápita 10 veces superiores a los actuales para la misma fecha.

4.5.3 Variables endógenas y costos estimados claves

Las variables endógenas, es decir, aquellas calculadas por el modelo, se agrupan en el cuadro 5.

La agregación de los resultados puede ser no ponderada, ponderada de acuerdo con la población regional o al PIB. Se determinan además los costos marginales del incremento de la temperatura y a partir de estos los costos marginales por tonelada métrica de carbono a partir de la voluntad a pagar. Se considera que los costos marginales de mitigación serán iguales en aquellas regiones que enfrenten un mismo impuesto a las emisiones de carbono.

Los costos estimados claves se señalan en el cuadro 6.

Cuadro 5**VARIABLES ENDÓGENAS**

Bienestar
Utilidad
Consumo per cápita
Producción (PIB)
Factor de cambio climático en el PIB
Reserva de capital
Energía del carbono
Costo de la energía del carbono
Emisiones industriales de CO ₂
Precio de los bonos para emisiones industriales (esta variable ser tratada como exógena, limitando las asignaciones de bonos)
Consumo
Inversión
Precio de la energía del carbono al por mayor (Rentas de Hotelling)
Emisiones industriales de CO ₂ acumuladas
Emisiones industriales globales de CO ₂
Concentración atmosférica de CO ₂
Emisiones totales globales de CO ₂
Concentración de CO ₂ en el reservorio biosfera/superficie oceánica
Concentración de CO ₂ en las profundidades oceánicas
Incremento en el forzamiento radiactivo con respecto a los niveles preindustriales
Incremento en la concentración atmosférica con respecto a 1990
Incremento en la concentración de CO ₂ en las profundidades oceánicas con respecto a 1990
Daño del cambio climático como fracción del PIB
Datos básicos del año de referencia (1995)

Fuente: Nordhaus y Boyer, 1999.

Cuadro 6**COSTOS ESTIMADOS CLAVES**

Tasa de interés
Tasa de descuento
Diferencia entre estos
Costo ambiental estimado del carbono
Diferencia entre el impuesto al carbono y el costo ambiental estimado del carbono

Fuente: Nordhaus y Boyer, 1999.

4.6. Análisis de políticas

El modelo RICE puede ser empleado de forma directa para la evaluación de los impactos económicos y ambientales de diferentes políticas para enfrentarse al cambio climático. Los autores agrupan las posibles políticas a seguir en cuatro grandes grupos:

- 1) No hacer nada para mitigar el cambio climático.

- 2) Variantes de una política óptima (definida de modo que las emisiones y los costos de carbono se establecen a valores óptimos de Pareto).
- 3) Limitaciones a variables ambientales (Protocolo de Kyoto, estabilización de las emisiones globales a los niveles de 1990, estabilización de las concentraciones al doble del nivel existente en la etapa preindustrial, establecimiento de políticas para limitar el aumento de la temperatura a un valor dado, entre otras posibilidades).
- 4) Salto tecnológico de gran magnitud (implementar una opción geo–ingenieril para contrarrestar el cambio climático).

La versión de Excel incluye macros para evaluar estas políticas con un esfuerzo mínimo. En GAMS está disponible el código fuente para los grupos 1 y 2.

4.7. Método de solución general

El usuario puede evaluar una política a través de las variables de control. Un enfoque es introducir los valores deseados en las variables de control, mientras que otro es especificar las condiciones que debe satisfacer la política y encontrar los valores de las variables de control que los satisfacen. El conjunto de condiciones se denomina *caso* y los valores de las variables de control que lo satisfacen son la solución del mismo, mientras que las variables endógenas y los costos estimados claves que resultan de la solución constituyen salidas.

El modelo puede ser modificado además variando los valores de las variables y parámetros exógenos o las ecuaciones. Este tipo de cambios no debe verse como la evaluación de una política, sino que implican diferencias en las restricciones económicas y ambientales que se imponen a la solución. Una posible excepción es alterar los coeficientes de la función de daño en el caso de la evaluación de un salto tecnológico de gran magnitud (opción geo–ingenieril).

Las condiciones para la solución de cada caso son diferentes, y estas a su vez se traducen en condiciones matemáticas. En el cuadro 7 se bosquejan las condiciones para la solución y las restricciones que estas implican para tres casos de ejemplo: el caso base (BAU), una variante óptima según Pareto y un caso donde las emisiones globales están limitadas.

4.8. Salidas del RICE

Las salidas del modelo RICE, en general, consisten en los valores de las variables endógenas y los costos estimados claves que resultan de la solución del caso de estudio que se esté evaluando (véanse el cuadro 5 y el cuadro 6). Sin embargo en determinados estudios, algunas de estas variables pueden fungir como variables exógenas; por ejemplo, el precio de los bonos para emisiones industriales, que normalmente es un resultado, en particular para BAU se iguala a cero representando que no se toma ninguna medida de control. Destacan entre los resultados más importantes: el incremento en la concentración atmosférica de CO₂ con respecto a 1990, el incremento en el forzamiento radiactivo con respecto a los niveles preindustriales y el daño del cambio climático expresado como fracción del PIB.

Cuadro 7**EJEMPLOS DE CASOS PARA EVALUAR POLÍTICAS EN EL MODELO RICE**

Caso	Condiciones para la solución	Condiciones matemáticas	Variables de políticas
Base	1. Tasas de ahorro optimizadas para cada región 2. Rentas de Hotelling	Tasa de retorno del capital igual a la tasa de descuento de la utilidad regional Las rentas de Hotelling se igualan al valor de descuento del efecto de la extracción marginal en el precio	Tasas de ahorro regionales Rentas de Hotelling
Óptimo de Pareto	3. Externalidades ignoradas en las emisiones 1. y 2. Como en el caso base 3. Condición de Samuelson para la propiedad pública 4. El costo marginal de la mitigación es el mismo entre países	El impuesto del carbono es cero El impuesto al carbono uniforme se iguala a la Voluntad a Pagar global marginal para la mitigación del carbono La derivada del PIB respecto de las emisiones industriales de carbono es la misma en cada región	Impuesto del carbono global Impuesto al carbono global Se asegura mediante el hecho de que cada región se enfrenta al mismo impuesto del carbono.
Límite en las emisiones	1. y 2. Como en el caso base 3. Emisiones globales limitadas 4. Como en el caso Óptimo de Pareto	La demanda de emisiones es igual al límite de emisiones global	Impuesto al carbono global

Fuente: Elaboración propia con base en Nordhaus y Boyer, 1999.

4.9. Comparación entre las implementaciones de RICE en Excel y GAMS

Al interpretar los resultados para RICE99 obtenidos mediante Excel y GAMS debe considerarse que existen diferencias en los cálculos globales de los impactos económicos como resultado del tratamiento distinto del comercio y el descuento. La versión de Excel emplea tasas de descuento variables en las diferentes regiones para descontar los costos y beneficios de las políticas en cada región mientras que la versión de GAMS usa una tasa de descuento común a todas las regiones. Las tasas de descuento diferentes traen consigo problemas en el cálculo de los impactos globales en la versión de Excel, particularmente cuando hay comercio de bonos de emisiones. Las diferencias surgen debido a que los valores de unidad de consumo en las diferentes regiones no son iguales, de modo que si una unidad de producción es transferida en un año futuro dado de una región de altos ingresos a otra de bajos ingresos esto disminuirá indebidamente el valor existente del ingreso mundial. Por el contrario, en la versión de GAMS las tasas de descuento son igualadas y este problema no surge.

Por otra parte, la interfase de Excel es más amigable, haciendo visible al usuario lo que está sucediendo y cuales son las consecuencias de cambios en los parámetros o las variables de control. Para ver las consecuencias de los cambios en GAMS hay que volver a ejecutar el programa y es fácil que puedan introducirse errores aunque sólo se hayan realizado cambios menores en el programa.

La hoja Excel provee al usuario de una amplia gama de variables de salida que permiten la creación de tablas y gráficos fácilmente. Se pueden crear variables adicionales con un esfuerzo mínimo. En cambio en GAMS para realizar esto mismo se requiere alguna experiencia o el esfuerzo de importar la salida a Excel u otra herramienta.

Los autores del modelo consideran que la solución en ambas implementaciones es exacta dentro de los límites de tolerancia de los programas actuales y que los tiempos de ejecución no difieren sustancialmente.

La versión de Excel es más sencilla de usar tal y como está diseñada. En cambio, la versión de GAMS es más fácilmente modificable para realizar pequeños cambios y sería la única opción si fuera preciso realizar cambios sustanciales en el modelo.

5. FUND

5.1. Regiones

FUND 2.8 incluye 16 regiones que se muestran en el siguiente cuadro. Versiones anteriores utilizaban nueve regiones. Está en desarrollo una versión por países.

Cuadro 8

REGIONES EN FUND 2.8

Siglas	Nombres	Países
USA	USA	Estados Unidos de América
CAN	Canadá	Canadá
WEU	Europa Occidental	Andorra, Austria, Bélgica, Chipre, Dinamarca, Finlandia, Francia, Alemania, Grecia, Islandia, Irlanda, Italia, Liechtenstein, Luxemburgo, Malta, Mónaco, Países Bajos, Noruega, Portugal, San Marino, España, Suecia, Suiza, Reino Unido.
JPK	Japón & la República de Corea	Japón, República de Corea
ANZ	Australia y Nueva Zelanda	Australia, Nueva Zelanda
CEE	Europa central y Oriental	Albania, Bosnia y Herzegovina, Bulgaria, Croacia, Republica Checa, Hungría, Republica de Macedonia, Polonia, Rumania, Eslovaquia, Eslovenia, Yugoslavia.
FSU	Antigua Unión Soviética	Armenia, Azerbaiyán, Bielorrusia, Estonia, Georgia, Kazajstán, Letonia, Lituania, Moldava, Rusia, Tayikistán, Turkmenistán, Ucrania, Uzbekistán.
MDE	Medio Oriente	Bahrein, Irán, Irak, Israel, Jordania, Kuwait, Líbano, Omán, Qatar, Arabia Saudita, Siria, Turquía, Emiratos árabes Unidos, Ribera Oriental/Gaza, Yemen.
CAM	América Central	Belice, Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Honduras, México, Nicaragua, Panamá.
SAM	América del Sur	Argentina, Bolivia, Brasil, Chile, Guyana Francesa, Guyana, Paraguay, Perú, Surinam, Uruguay, Venezuela.
SAS	Asia del Sur	Afganistán, Bangladesh, Bhután, India, Nepal, Pakistán, Sri Lanka.
SEA	Asia Sur Oriental	Brunei, Camboya, Timor Oriental, Indonesia, Laos, Malasia, Myanmar, Papúa Nueva Guinea, Filipinas, Singapur, Taiwán, Tailandia, Vietnam.
CHI	China plus	China, Hong Kong, República Popular Democrática de Corea, Macao, Mongolia.
NAF	África del Norte	Argelia, Egipto, Libia, Marruecos, Túnez, Sahara Occidental
SSA	Afrecha sub-sahariana	Angola, Benin, Botswana, Burkina Faso, Burundi, Camerún, Cabo Verde, República de África Central, Chad, Congo–Brazzaville, Congo – Kinshasa, Costa de Marfil, Guinea Ecuatorial, Eritrea, Etiopía, Gabón, Gambia, Ghana, Guinea, la Guinea – Bissau, Kenya, Lesotho, Liberia, Madagascar, Malawi, Mauritania, Mozambique, Namibia, Níger, Nigeria, Ruanda, Senegal, Sierra Leona, Somalia, Sudáfrica, Sudán, Swazilandia, Tanzania, Togo, Uganda, Zambia, Zimbabwe
SIS	Pequeñas Islas	Antigua y Barbuda, Aruba, Bahamas, Barbados, Bermudas, Comoros, Cuba, Dominica, República Dominicana, Fiji, Polinesia francesa, Granada, Guadalupe, Haití, Jamaica, Kiribati, Maldivas, Islas del Mariscal, Islas Martinicas, Mauricio, Micronesia, Nauru, Antillas Neerlandesas, Nueva Caledonia, Palau, Puerto Rico, Reunión, Samoa, Santo Tome y Príncipe, Seychelles, Islas Salomón, San Cristóbal y Nieves, Santa Lucía, San Vicente Granadinas, Tonga, Trinidad y Tábano, Tuvalu, Vanuatu, Islas Vírgenes,

Fuente: Tol, Richard S.J., 2006a.

5.2. Especificación temporal

El modelo corre desde 1950 hasta 2300 en pasos temporales de un año. Se asume que los impactos en un año dependen de los impactos del año anterior, de modo que sea posible reflejar el proceso de ajuste o adaptación al cambio climático. Los datos del período 1950–1990 están basados en observaciones históricas (Base de Datos IMAGE 2) (The IMAGE 2 Hundred Year, 1890–1990). Los del período 1990–2100, conforman los escenarios FUND, basados en los escenarios del IPCC ajustados a las 16 regiones con paso anual y los del 2100–2300 constituyen una extrapolación de las tendencias de población, económicas y tecnológicas para el período 2050–2100, considerando un proceso de cambio gradual hasta alcanzar un estado estacionario de la población, la economía y la tecnología.

5.3. Contaminantes

Además de los principales gases de efecto invernadero: CO₂, metano, CH₄ y óxido nitroso N₂O, modela las emisiones de SO₂ y su influencia en el forzamiento radiactivo, ocasionado por los aerosoles de sulfato de los que es precursor.

5.4. Concepción general

FUND está constituido por un conjunto de escenarios exógenos y perturbaciones endógenas, específicas para las regiones consideradas. Los escenarios incluyen las tasas de crecimiento de la población, y de la economía, el mejoramiento de la eficiencia energética, la tasa de descarbonización del uso de la energía (Mejoramiento de la eficiencia de carbón), las emisiones de CO₂ por cambios en el uso de la tierra, y las de CH₄ y N₂O.

Los escenarios del crecimiento económico y de población son perturbados por el cambio climático:

- La población decrece con el incremento del cambio climático debido a las muertes ocasionadas por episodios de calor o frío intenso, malaria, dengue, esquistosomiasis y diarrea. Se asume que los episodios de calor o frío intenso sólo afectan a los ancianos (población en edad no reproductiva) y que los episodios de calor intenso sólo afectan a la población urbana. La fracción de la población urbana por regiones se toma de World Resources Database (WRI, 2001).
- El cambio climático también induce migración entre las regiones del mundo produciendo cambios en la población. Se asume que los inmigrantes son asimilados inmediata y completamente por la población del país receptor.
- El cambio climático reduce el crecimiento económico a largo plazo. A corto plazo el consumo está particularmente afectado. El crecimiento económico también se ve afectado por las medidas para la disminución del dióxido de carbono. La intensidad energética de la economía (energía usada/ PIB) y la intensidad de carbono de la energía suministrada (emisión de carbono/energía suministrada) decrece con el tiempo.

5.5. Datos de entrada

Los datos de entrada se le suministran al programa a través de ficheros de texto, formato ASCII. Estos datos representan el escenario a evaluar; por defecto el “escenario FUND” y la mayor parte de los parámetros de las ecuaciones de impactos y de costos utilizadas.

Otros parámetros de las ecuaciones, incluso diferenciadas por regiones, se dan como constantes en el programa. Algunos ficheros de salida de determinadas opciones pueden ser entrada de otras.

5.5.1 Datos de Población

- Ficheros de entrada
 - pop0.001: Población en 1950 (en millones), 16 filas (regiones) / 1 columna
 - pgrowth.001: Crecimiento de la población por año. 351 filas (años 1950–2300) / 16 Columnas (regiones)
- Constantes
 - Población en 1990 por regiones
 - Población > 65 años en 1990 por regiones

5.5.2 Datos Económicos

- Ficheros de entrada
 - inc0.001: PIB del 1950, billones de dólares, 16 filas (regiones) / 1 columna
 - ypcgrowth.001: Crecimiento del PIB por año, 351 filas (años 1950–2300) / 16 Columnas (regiones)
 - discrte.001: Tasa de descuento. Por defecto se asume igual a 0.01, 16 filas (regiones) / 1 columna. Se utiliza en estimar los valores presentes de los costos asociados al aumento del nivel del mar y el valor neto presente del beneficio
- Constantes
 - PIB en 1990 por regiones

5.5.3 Datos Tecnológicos

- Ficheros de entrada
 - aeei.001: aeei, ⁴ tasa de cambio autónoma de la intensidad energética, 1930–2300, 351 filas (años 1950–2300) / 16 Columnas (regiones)
 - acei.001: acei, tasa de descarbonización autónoma del uso de la energía (Mejoramiento de la eficiencia de carbón), 1930–2300, 351 filas (años 1950–2300) / 16 Columnas (regiones)

⁴ aeei y acei reflejan las tasas de cambio autónomas de la eficiencia energética y del carbono respectivamente, debido a mejoras tecnológicas y se denominan autónomas porque no depende de los precios de la energía ni de la política energética.

- Constante
 - Intensidad energética por regiones en 1990
 - Intensidad de carbón por regiones en 1990

5.5.4 Datos de emisiones exógenas y adicionales

- Ficheros de entrada (millones de toneladas)
 - n2oem.001: Emisiones exógenas de N₂O de las 16 regiones en todo el período 1950–2300
 - ch4em.001: Emisiones exógenas de CH₄ de las 16 regiones en todo el período 1950–2300
 - forestem.001: Emisiones de CO₂ por uso de suelos, 351 filas (años 1950–2300) / 16 Columnas (regiones)
 - addch4.001: Emisiones adicionales de CH₄,
 - addn2o.001: Emisiones adicionales de N₂O,
 - addco2.001: Emisiones adicionales de CO₂,
- Constantes
 - Emisiones acumuladas de CO₂ por regiones hasta 1950
 - Emisiones antropogénicas de SO₂ en 1950

5.5.5 Datos de reducción de emisiones

- Ficheros de entrada
 - methpara.001: Parámetros y desviaciones estándar de la curva de costos de reducción de las emisiones de CH₄, 16 filas (regiones), 4 columnas
 - nitrox.001: Parámetros y desviaciones estándar de la curva de costos de reducción de las emisiones de N₂O, 16 filas (regiones), 4 columnas
 - forparam.001: Parámetros de la ecuación reducción de las emisiones de CO₂ a través de la reforestación, 16 filas/regiones, 3 columnas

5.5.6 Clima

- Ficheros de entrada
 - bregtmp.00, 16 filas/regiones:
 - Temperatura de la región/ temperatura global,
 - Temperatura Promedio obtenida de 14 Modelos de Circulación Global 1961–1990
 - regtmp.001: Temperatura de la región/ temperatura global,
 - scengmt.001: Incremento de la temperatura por año y regiones. Opcional
 -

5.5.7 Incertidumbres

- scenunc.001: Desviación estándar por regiones del escenario evaluado en cuanto a:
 - Tasa de crecimiento de la población y el ingreso per cápita,
 - aeei, acei,
 - Emisiones de CO₂ relacionadas con la deforestación

5.5.8 Impactos

5.5.8.1 Agricultura

- Ficheros de entrada
 - agricult.001: Valor medio y desviación estándar por regiones, 16 filas/regiones:
 - Tasa de impacto por el cambio de 0,04 °C (0,04 °C es considerado el calentamiento anual base), expresado como una fracción de PAB (Producto Agrícola Bruto), α_r
 - Tasa de impacto por el cambio de 2,5 °C, expresado como una fracción de PAB, A^B_r
 - Temperatura optima, expresada en °C (valor por encima de la temperatura preindustrial), T^{opt}
 - Tiempo de adaptación, ρ
 - Parámetro de impacto por efecto de fertilización del CO₂, γ_r
 - agrish.001: Contribución de la agricultura al PIB en 1990, por regiones, 16 filas/regiones, $\alpha_{0_t,r}$

5.5.8.2 Bosques

- Ficheros de entrada
 - forestry.001: Valor medio y desviación estándar del parámetro de impacto en la silvicultura (explotación de los bosques) por el aumento en 1 °C, expresado como fracción del PIB, 16 filas/regiones.

5.5.8.3 Elevación del nivel del mar

- Ficheros de entrada
 - dryland.001: 16 filas/regiones. Valor medio y desviación estándar del área de tierra seca perdida por la elevación del mar en un metro, km², DL1m
 - protect.001: 16 filas/regiones
 - Longitud de la costa
 - Valor medio y desviación estándar de los costos de protección anuales de las costas cuando el nivel del mar aumenta 1 m, PCa
 - wetland.001: Tierra húmeda, 16 filas/regiones
 - Valor medio y desviación estándar del área de terrenos pantanosos perdidos por la elevación del nivel mar en 1 m,
 - Valor medio y desviación estándar del área de terrenos pantanosos perdidos cuando se realiza protección total de la costa,
 - Area de pantanos en 1990, Lmax
- Constantes
 - Densidad de población en las regiones costeras en 1990

5.5.8.4 Salud

5.5.8.4.1 Episodios de calor y frío intenso – afecciones cardiovasculares

- Ficheros de entrada
 - cardcold.00: Parámetros para la ecuación de afecciones cardiovasculares por frío. 16 filas/regiones:
 - Parámetro lineal y su desviación estándar para < 65 años
 - Parámetro cuadrático y su desviación estándar para < 65 años
 - Parámetro lineal y su desviación estándar para > 65 años
 - Parámetro cuadrático y su desviación estándar para > 65 años
 - cardheat.001: Parámetros para la ecuación de afecciones cardiovasculares por calor. 16 filas/regiones:
 - Parámetro lineal y su desviación estándar para < 65 años
 - Parámetro cuadrático y su desviación estándar para < 65 años
 - Parámetro lineal y su desviación estándar para > 65 años
 - Parámetro cuadrático y su desviación estándar para > 65 años
- Constantes
 - tasa de mortalidad en los años 90 por problemas cardiovasculares

5.5.8.4.2 Episodios de calor y frío intenso – afecciones respiratorias

- Ficheros de entrada
 - resp.001: Parámetros de afecciones respiratorias, 16 filas/regiones
 - Parámetro lineal y su desviación estándar
 - Parámetro cuadrático y su desviación estándar
- Constantes
 - tasa de mortalidad en los años 90 por problemas respiratorios

5.5.8.4.3 Enfermedades inducidas por vectores

- dengue.001: Datos de dengue, 16 filas/regiones
 - tasa base de mortalidad, expresada en número de muertes por cada millón de personas
 - Valor medio y desviación estándar del cambio en la tasa base de mortalidad por dengue debido a 1 °C de calentamiento, expresados como fracción de la tasa base. En todas las regiones tienen el mismo valor de 0.3534 y 0.0614, respectivamente
- malaria.001: Datos de Malaria, 16 filas/regiones
 - tasa base de mortalidad, expresada en número de muertes por cada millón de personas
 - Valor medio y desviación estándar del cambio en la tasa base de mortalidad por malaria debido a 1 °C de calentamiento, expresados como fracción de la tasa base.
- schisto.001: Datos de esquistosomiasis, 16 filas/regiones

- tasa base de mortalidad, expresada en número de muertes por cada millón de persona
- Valor medio y desviación estándar del cambio en la tasa base de mortalidad por esquistosomiasis debido a 1 °C de calentamiento, expresados como fracción de la tasa base.

5.5.8.4.4 Diarrea

- diarrea.001: Datos de diarrea, 16 filas/regiones
 - número de muertes adicionales por cada 1.000 personas
 - años de vida padeciendo la enfermedad por cada 1.000 personas

5.5.8.4.5 Mortalidad: Años de vida perdidos por casos

El Fichero yll.001 (véase el cuadro 9) indica los años de vida perdidos por cada caso para las distintas enfermedades consideradas.

Cuadro 9

AÑOS DE VIDA PERDIDOS POR CASOS

Sigla	Malaria	Esquistosomiasis	Dengue	Afecciones Cardiovasculares	Afecciones Respiratorias
USA	0	0	0	4,82	5,15
CAN	0	0	0	4,82	5,15
WEU	0	0	0	4,82	5,15
JPK	0	0	0	4,82	5,15
ANZ	0	0	0	4,82	5,15
EEU	0	0	0	6,08	6,91
FSU	0	0	0	6,08	6,91
MDE	29,14	21,50	0	11,58	17,14
CAM	28	10	0	8,64	11,95
SAM	28	10	0	8,64	11,95
SAS	29,58	0	36,67	8,96	12,01
SEA	29,57	7	36	11,93	12,64
CHI	0	16	29	7,67	6,25
NAF	29,14	21,50	0	11,58	17,14
SSA	33,31	20	21	12,92	14,69
SIS	28	10	0	8,64	11,95

Fuente: Tol, Richard (2006a).

5.5.8.4.6 Morbilidad

- yld.001: razón de los impactos de morbilidad (expresados en años de vida con discapacidades) y los de mortalidad (expresados en número de casos).

5.5.8.5 Consumo de energía

- Ficheros de entrada.
 - cooling.001:
 - Valor medio y desviación estándar del parámetro de la ecuación de impacto de costos en energía por climatización y refrigeración debido al calentamiento en un 1°C, expresados como fracción del PIB, 16 filas regiones
 - heating.001:
 - Valor medio y desviación estándar del parámetro de la ecuación de impacto de los costos en energía para calefacción debido al calentamiento en un 1°C , expresados como fracción del PIB, 16 filas regiones

5.5.8.6 Recursos hídricos

- Fichero de entrada
 - water.001: Valor medio y desviación estándar del impacto en los recursos hídricos por calentamiento en 1 °C, expresados como fracción del PIB, 16 filas/regiones.

5.5.8.7 Migración

- migrate.001: Matriz de migración, valor medio y desviación estándar, entre las 16 regiones. 32 filas, 16 columnas.

5.6. Metodología ⁵

5.6.1 Emisiones

Las emisiones de CO₂ en el año t y la región r , $EM_{t,r}$, se calculan a través de la identidad de Kaya en función de la energía usada, E , el producto interno bruto, Y , y la población, Pob :

$$(5-1) \quad EM_{t,r} = \frac{EM_{t,r}}{E_{t,r}} \frac{E_{t,r}}{Y_{t,r}} \frac{Y_{t,r}}{Pob_{t,r}} Pob_{t,r} = \Psi_{t,r} \varphi_{t,r} Y_{t,r}, \text{ Mton}$$

$$(5-2) \quad \Psi_{t,r} = \frac{EM_{t,r}}{E_{t,r}} : \frac{\text{Emisiones}}{\text{Energía}}, \text{ Mton/TJoule}$$

$$(5-3) \quad \varphi_{t,r} = \frac{E_{t,r}}{Y_{t,r}} : \frac{\text{Energía}}{\text{PIB}}, \text{ TJoule/B\$}$$

⁵ Véase Richard Tol, 2006b.

Donde Ψ y φ son la intensidad de carbón de la energía usada y la intensidad de energía respectivamente. Estas variables se calculan mediante las expresiones siguientes donde τ expresa la política de manipulación del mercado, por ejemplo impuestos; α es un parámetro que indica qué parte de la reducción de emisiones es permanente (reduciendo el carbono y sus intensidades de energía para siempre) y qué parte es temporal (reduciendo los consumos de energía y emisiones de carbono actuales) y g representa las tasas de crecimiento exógeno expresadas como mejoras autónomas en la eficiencia energética (aeei) y en la eficiencia del carbono (acei).

$$(5-4) \quad \Psi_{t,r} = g_{t-1,r}^{\Psi} \Psi_{t-1,r} - \alpha \tau_{t-1,r}^{\Psi}, \text{ Mton/TJoule}$$

$$(5-5) \quad \varphi_{t,r} = g_{t-1,r}^{\varphi} \varphi_{t-1,r} - \alpha \tau_{t-1,r}^{\varphi}, \text{ TJoule/B\$}$$

Finalmente:

$$(5-6) \quad EM_{t,r} = (\Psi_{t,r} - \chi_{t,r}^{\Psi})(\varphi_{t,r} - \chi_{t,r}^{\varphi})Y_{t,r}, \text{ Mton}$$

$$(5-7) \quad \chi_{t,r}^{\Psi} = (\kappa_{\Psi} \chi_{t-1,r}^{\Psi})(1 - \alpha) \tau_{t-1,r}^{\Psi}, \text{ Mton/Tjoule}$$

$$(5-8) \quad \chi_{t,r}^{\varphi} = (\kappa_{\varphi} \chi_{t-1,r}^{\varphi})(1 - \alpha) \tau_{t-1,r}^{\varphi}, \text{ TJoule/B\$}$$

Donde κ_{Ψ} y κ_{φ} son parámetros que caracterizan la velocidad de disminución de las emisiones y toman valores entre 0 y 1. Para el caso base se asume $\alpha=0.5$, $\kappa_{\Psi}=\kappa_{\varphi}=0.9$.

5.6.2 Costos de reducción

El módulo de reducción de emisiones es una modelación simplificada que tiene en cuenta:

- qué parte de la reducción de la emisión es temporal, es decir desaparece en el tiempo después de la intervención política y qué parte es permanente ,
- y los efectos de aprendizaje.

El costo de la reducción de emisiones es menor si no se realiza bruscamente. Es relativamente mayor en las regiones con baja intensidad de emisiones y % de contribución de combustibles fósiles y que están por consiguiente más cercanos a las fronteras tecnológicas que constituyen límites a la disminución de las emisiones. El costo de la reducción de emisiones es relativamente bajo en las regiones con altas intensidades de emisiones y que usan mucha energía con base en combustibles fósiles.

Las acciones de conocimientos regionales y globales se expresan como:

$$(5-9) \quad H_{t,r} = H_{t-1,r} \sqrt{1 + \gamma_R \tau_{t-1,r}}$$

$$(5-10) \quad H_{t,r}^G = H_{t-1,r}^G \sqrt{1 + \gamma_G \tau_{t-1,r}}$$

El conocimiento aumenta con la reducción de emisiones. Más conocimiento implica costos más bajos de reducción de emisiones. El parámetro γ determina qué parte del conocimiento es mantenido en la región y qué parte se transfiere a otras regiones. En el caso base $\gamma_R=0.9$ y $\gamma_G=0.1$.

Finalmente la reducción de las emisiones de CH_4 y N_2O (ΔE_{CH_4} y ΔE_{N_2O}) y los costos de reducción correspondientes (CR_{CH_4} , CR_{N_2O}) se estiman utilizando las expresiones siguientes a partir de las emisiones correspondientes (E_{CH_4} y E_{N_2O}) y los parámetros P1 y P2 (CH_{4_P1} , CH_{4_P2} , N_2O_{P1} y N_2O_{P2}) que se dan como datos de entrada en los ficheros methpara.001 y nitrox.001 respectivamente. CM representa los costos marginales de reducción de las emisiones.

$$(5-11) \quad \Delta E_{CH_{4t,r}} = 21 * \frac{22}{6*1000} 1.05^{(t-50)} \frac{E_{CH_{4t,r}}}{2CH_{4_P1}CH_{4_P2}^2 Y_{t,r}} CM, \text{ Mton}$$

$$(5-12) \quad \Delta E_{N_2O_{t,r}} = 310 * \frac{7}{6*1000} 1.05^{(t-50)} \frac{E_{N_2O_{t,r}}}{2N_2O_{P1}N_2O_{P2}^2 Y_{t,r}} CM, \text{ Mton}$$

$$(5-13) \quad CR_{CH_{4t,r}} = CH_{4_P1}CH_{4_P2}^2 \Delta E_{CH_{4t,r}}, \text{ \$/ton}$$

$$(5-14) \quad CR_{N_2O_{t,r}} = N_2O_{P1}N_2O_{P2}^2 \Delta E_{N_2O_{t,r}}, \text{ \$/ton}$$

5.6.3 Atmósfera y Clima

5.6.3.1 Concentración

Las concentraciones anuales de metano y óxido nitroso, C_t , se calculan mediante la siguiente expresión en función de las respectivas concentraciones en la etapa preindustrial, C_{pre} , las concentraciones en el año anterior, C_{t-1} , y las emisiones mundiales en el año, EM_t . (Véase el cuadro 10).

$$(5-15) \quad C_t = C_{t-1} + \alpha EM_t - \beta(C_{t-1} - C_{pre}), \text{ ppb}$$

Donde:

α , parámetro que convierte las emisiones (dadas en millones de toneladas métricas) en concentraciones (dadas en partes por billón por volumen);

β , parámetro que determina cuan rápido las concentraciones regresan a su valor preindustrial (y supuestamente de equilibrio);

$1/\beta$, es el tiempo de vida de los gases (en años) en la atmósfera.

Cuadro 10**PARÁMETROS DE LA ECUACIÓN DE CONCENTRACIÓN DE CH₄ y N₂O**

Gas	α^a	β^b	Concentración preindustrial
Metano (CH ₄)	0.3597	1/8.6	790 ppb
Óxido nitroso (N ₂ O)	0.2079	1/120	285 ppb

Fuente: Tol, Richard, 2006a.

La concentración atmosférica de CO₂ utiliza el modelo de 5 cajas, que supone que el CO₂ se comporta como 5 gases con velocidades de decaimiento diferentes:

$$(5-16) \quad C_{i,t} = \rho_i C_{i,t-1} + 0.000471 \alpha_i EM_t, \quad C_t = \sum_{i=1}^5 \alpha_i C_{i,t}, \text{ ppm}$$

Donde:

α_i : es la fracción de las emisiones (en millones de toneladas métricas de carbón) que existen en cada caja (véase el cuadro 11).

ρ_i : tasa de decaimiento de las cajas, $\rho_i = e^{-1/\text{tiempodevida}}$ (véase el cuadro 11)

Cuadro 11**PARÁMETROS DE LA ECUACIÓN DE CONCENTRACIÓN DE CO₂**

Caja	α_i	Tiempo de vida(años)
1	0,13	∞
2	0,20	363
3	0,32	74
4	0,25	17
5	0,10	2

Fuente: Tol, Richard, 2006a.

Así, el 13% del total de las emisiones permanece por siempre en la atmósfera, mientras que el 10% es removido en dos años.

5.6.3.2 Emisiones de SO₂

Para el SO₂, en lugar de las concentraciones, se estiman las emisiones en función de la población, el PIB per cápita (y), y las tasas de incremento de la eficiencia energética ($aeei$) y del carbón ($acei$), con elasticidades de 0,33 para la población, -0,45 para los ingresos (las emisiones disminuyen al aumentar el PIB per cápita) y 1,02 para $aeei$ y $acei$, mediante la siguiente expresión.

$$(5-17) \quad ESO_{2t,r} = ESO_{2t-1,r} \left(1 + \frac{\Delta P ob_{t-1,r}}{100} \right)^{0.33} \left(1 + \frac{y_{t-1,r}}{100} \right)^{-0.45} \left(1 - \frac{ae ei_{t,r}}{100} - \frac{ace i_{t,r}}{100} \right)^{1.02}, \text{ Mton}$$

5.6.3.3 Forzamiento radiactivo

Para la estimación del forzamiento radiactivo anual en función de las concentraciones anuales correspondientes y las existentes en la etapa preindustrial, se utilizan las siguientes expresiones:

$$(5-18) \quad RF_{CO_{2t}} = 6.3 \ln \left(\frac{CO_{2t}}{CO_{2pre}} \right), \text{ W/m}^2$$

$$(5-19) \quad RF_{CH_{4t}} = 0.036 \left(\sqrt{CH_{4t}} - \sqrt{CH_{4pre}} \right) - Inter(CH_{4t}, N_2 O_{pre}) + Inter(CH_{4pre}, N_2 O_{pre}),$$

$$(5-20) \quad RF_{N_2 O_t} = 0.14 \left(N_2 O_t - \sqrt{N_2 O_{pre}} \right) - Inter(CH_{4pre}, N_2 O_t) + Inter(CH_{4pre}, N_2 O_{pre}),$$

INTER es una función que devuelve la interacción entre los forzamiento radiactivos del CH_4 y el N_2O . El forzamiento radiactivo debido al SO_2 se estima a partir de sus emisiones, Eso_{2t} . Se considera que las emisiones antropogénicas en 1950 ascendían a 14,6 Tg de Azufre y las emisiones naturales a 34,4 Tg.

$$(5-21) \quad RF_{SO_{2t}} = 0.3 \frac{Eso_{2t}}{14.6} + 0.8 \frac{\ln \left(1 + \frac{Eso_{2t}}{34.4} \right)}{\ln \left(1 + \frac{14.6}{34.4} \right)} - 3, \text{ W/m}^2$$

El forzamiento radiactivo total es debido a la contribución de los antes calculados.

$$(5-22) \quad RF_t = RF_{CO_{2t}} + RF_{CH_{4t}} + RF_{N_2 O_t} - RF_{SO_{2t}}, \text{ W/m}^2$$

5.6.3.4 Temperatura

La temperatura media global T es gobernada por un desarrollo geométrico hacia su equilibrio determinado por el forzamiento radiactivo RF, con un tiempo medio de 50 años. En el caso base la temperatura media global alcanza el equilibrio para 2,5°C por encima del valor preindustrial.

$$(5-23) \quad T_t = \left(1 - \frac{1}{50} \right) T_{t-1} + \frac{1}{50} \frac{2.5}{6.3 \ln(2)} RF_t, \text{ } ^\circ\text{C}$$

5.6.3.5 Nivel del mar

El nivel del mar en cada año t del período evaluado N_t también tiene un comportamiento geométrico, con el equilibrio determinado por la temperatura y un tiempo de vida de 50 años. Se estima por la siguiente expresión en función del nivel en el año anterior N_{t-1} y el de referencia N_0 .

$$(5-24) \quad N_t = \left(1 - \frac{1}{50}\right) N_{t-1} + \frac{1}{50} N_o T_t, m$$

5.6.4 Parámetros económicos y sociales

El programa calcula parámetros económicos y sociales (ingreso anual y población) que son utilizados en los impactos, como son la población y el ingreso por año. Para eso el programa utiliza los datos de entrada de crecimiento poblacional por año para cada una de las regiones y el crecimiento del ingreso por año.

5.6.5 Impactos

De forma general los diferentes impactos en FUND, $I_{t,r}^d$, son función del incremento de temperatura y de la razón de crecimiento de la economía con respecto al año base expresada por los ingresos per cápita con elasticidad e_r^d :

$$(5-25) \quad I_{t,r}^d = f_{t,r}(\Delta T_{t,r}) \left(\frac{y_{t,r}}{y_{0,r}} \right)^{e_r^d}$$

5.6.5.1 Agricultura

Los impactos del cambio climático en la agricultura dependen tanto del ritmo de ocurrencia como del nivel total de incremento de la temperatura. El cambio en la producción agrícola debido al ritmo de ocurrencia del cambio climático se expresa como:

$$(5-26) \quad A_{t,r}^r = \alpha_r \left(\frac{\Delta T_t}{0.04} \right)^\beta + \left(1 - \frac{1}{\rho} \right) A_{t-1,r}^r$$

Donde:

t , año;

r , región;

ΔT , cambio en la temperatura media global en el año t ;

α_r , parámetro de referencia estimado en función de la región;

β , parámetro que expresa la no linealidad con respecto a la temperatura. Se asume igual a 2 con intervalo de confianza de 1,5 a 2,5; 2 (1,5 – 2,5);

ρ , representa el tiempo de adaptación. Se considera igual a 10 (5 – 15).

El cambio en la producción agrícola debido al nivel de incremento de la temperatura se calcula como:

$$(5-27) \quad A_{t,r}^l = \frac{-2A_r^B T_r^{opt}}{1-2T_r^{opt}} \Delta T_t + \frac{A_r^B T_r^{opt}}{1-2T_r^{opt}} \Delta T_t^2$$

Donde:

ΔT , cambio en la temperatura media global relativa a 1990;

T^{opt} , temperatura óptima;

A_r^B , parámetro de referencia estimado en función de la región y suministrado como datos de entrada.

El CO₂ tiene efecto fertilizador pero éste se satura, y el cambio en la producción agrícola debido a este efecto se calcula en función de la concentración del CO₂ en la atmósfera con respecto a la concentración en la atmósfera preindustrial, 275, y un parámetro de referencia estimado en función de la región γ_r .

$$(5-28) \quad A_{t,r}^f = \gamma_r \ln\left(\frac{CO_{2t}}{275}\right)$$

Finalmente el impacto total en la agricultura se calcula como la suma de los cambios antes calculados, por el Producto Agrícola Bruto. Este se valora como una fracción del PIB, $\alpha_{t,r}$.

$$(5-29) \quad A_{t,r}^T = (A_{t,r}^r + A_{t,r}^l + A_{t,r}^f) \alpha_{t,r} Y_{t,r}, \text{ B\$}$$

La contribución de la agricultura al PIB, $\alpha_{t,r}$ disminuye con el ingreso per cápita, con una elasticidad de -0.31 (0.15-0.45) para todas las regiones, según la expresión:

$$(5-30) \quad \alpha_{t,r} = \alpha_{0,t,r} \left(\frac{Y_{t,r}}{Y_{90,t,r}}\right)^{-0.31}$$

5.6.5.2 Bosques

El cambio en los consumos relacionados con la silvicultura y sus productos derivados, como fracción del PIB total, es función lineal de la temperatura media global con elasticidad $\beta = 1$ (0,5-1,5); de la razón de incremento del ingreso per cápita con respecto a 1990 con elasticidad $\varepsilon = 0.31$ (0.11-0.51); y del logaritmo de la razón de incremento de la concentración de CO₂ con respecto a la preindustrial con un factor $\gamma = 0.44$ (0.29-0.87). Este valor se ajustó de forma tal que al duplicarse la concentración de CO₂, el cambio en este impacto es del 15%.

$$(5-31) \quad F_{t,r} = \alpha_r \left(\frac{Y_{t,r}}{Y_{90,t,r}}\right)^\varepsilon \left(0.5T_t^\beta + 0.5\gamma \ln\left(\frac{CO_{2t}}{275}\right)\right)$$

Donde α_r es el parámetro de referencia estimado en función de la región y suministrado como dato de entrada.

5.6.5.3 Especies, ecosistemas y paisajes

El modelo FUND estima los daños en ecosistemas, especies y paisajes, $DE_{t,r}$ como fracción del PIB total, Y , en función de los ingresos per cápita y , la población Pob , el cambio en la temperatura regional ΔT , y de la razón de disminución del número de especies B_0/B_t (B_0 es el número inicial de especies asumido como 14.000.000) mediante la siguiente expresión:

$$(5-32) \quad \frac{DE_{t,r}}{Y_{t,r}} = \alpha Pob_{t,r} \left(\frac{y_{t,r}/y_b}{1 + y_{t,r}/y_b} \right) \left(\frac{\Delta T_{t,r}/\tau}{1 + \Delta T_{t,r}/\tau} \right) \left(1 - \sigma + \sigma \frac{B_0}{B_t} \right)$$

Los ingresos per cápita de cada región se ajustan a los de la OECD, $y_b = 30000$ (10000), por considerarla como región de referencia. El parámetro α se ajusta de forma tal que los daños se igualan a \$50 por persona si el ingreso per cápita es igual al promedio en la OECD en 1990. Los demás parámetros considerados en la ecuación son $\tau = 0.025$; $\sigma = 0.05$, con desviación estándar de 0.05.

El número de especies se estima como función cuadrática del incremento de temperatura con factor $\gamma = 0.001$ con desviación estándar de 0.001; $\gamma = 0.001$ (0.001) y del parámetro $\rho = 0.003$ (0.002).

$$(5-33) \quad B_t = B_{t-1}(1 - \rho - \gamma \Delta T_{t-1}^2)$$

5.6.5.4 Elevación del nivel del mar

Los impactos ocasionados por la elevación del nivel del mar están relacionados con la pérdida de terrenos secos y de terrenos pantanosos y por las obras de protección que se deben realizar para evitar la inundación de áreas de terrenos secos que lo ameriten. Las obras de protección pueden considerarse como una inversión. La determinación del perímetro de costa a proteger, L , se determina a partir de un análisis Costo-Beneficio. Las ecuaciones utilizadas son las siguientes:

$$(5-34) \quad L_r = \min \left\{ 0, 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{PC_r + WL_r}{DL_r} \right) \right\}, \text{ m}$$

$$(5-35) \quad PC_r = \sum_{t=1}^{\infty} \left(\frac{1}{1 + \rho + g_{t,r}} \right)^t PC_a = \frac{1 + \rho_r + g_r}{\rho_r + g_r} PC_a, \text{ M\$}$$

$$(5-36) \quad WL_r = \sum_{t=0}^{\infty} t \left(\frac{1}{1 + \rho + g_{t,r}} \right)^t WL_{t=1} = \frac{1 + \rho_r + g_r}{(\rho_r + g_r)^2} WL_{t=1}, \text{ M\$}$$

$$(5-37) \quad DL_r = \sum_{t=0}^{\infty} t \left(\frac{1}{1 + \rho + g_{t,r}} \right)^t DL_{t=1} = \frac{(1 + g_r)(1 + \rho_r + g_r)}{\rho_r} WL_{t=1}, \text{ M\$}$$

Donde:

PC , valor neto presente de protección si toda la costa fuera protegida;

ρ , tasa de descuento;

g , tasa de crecimiento de la economía;

PC_a , costo promedio anual de la protección;

WL , valor neto presente del terreno pantanoso perdido debido a la protección completa de la costa

$WL_{t=1}$, valor del terreno pantanoso perdido en el primer año,

DL , valor neto presente del terreno seco perdido si no existiera protección,

$DL_{t=1}$, valor del terreno seco perdido en el primer año,

El valor de los terrenos pantanosos perdidos se asume en función de los ingresos per cápita como:

$$(5-38) \quad WW_{t,r} = WW_0 \frac{\frac{y_{t,r}}{30000}}{1 + \frac{y_{t,r}}{30000}} \max \left(2, 1 - \sigma + \sigma \frac{L_{\max,r}}{L_{\max,r} - L_{t,r}} \right), \text{ M\$/km}^2$$

Donde:

t , año

r , región;

$y_{t,r}$, PIB per cápita;

$L_{t,r}$, pérdidas de pantanos hasta la fecha;

L_{\max} , área de pantanos en 1990, lo que representa el área máxima de pantanos que puede perderse por la elevación del nivel del mar;

WW_0 , parámetro que representa el valor de referencia de los terrenos pantanosos, M\$ 2 / km² en los países de la OECD y que se ajusta a las demás regiones con base en los ingresos per cápita correspondientes

σ , parámetro 0,05;

Las áreas de terreno pantanoso perdido y los costos correspondientes se estiman por las siguientes expresiones:

$$(5-39) \quad WL_{w_t,r} = \alpha_{wr} N_{t,r}, \text{ km}^2$$

$$(5-40) \quad WL_{p_t,r} = WL_{p_t-1,r} + WLo_r \Delta N_{t,r} L_{t,r} \text{ km}^2$$

$$(5-41) \quad WL_{t_t,r} = WL_{w_t,r} + WL_{p_t,r}, \text{ km}^2$$

$$(5-42) \quad WL_{wa_t,r} = \alpha_{wr} \Delta N_{t,r}, \text{ km}^2$$

$$(5-43) \quad WL_{pa_t,r} = WLo \Delta N_{t,r} L_{t,r}, \text{ km}^2$$

$$(5-44) \quad WL_{ta_t,r} = WL_{wa_t,r} + WL_{pa_t,r}, \text{ km}^2$$

$$(5-45) \quad WC_{t,r} = WV_{t,r} WL_{ta_t,r}, \text{ M\$}$$

Donde:

$WL_{w_t,r}$, $WL_{p_t,r}$, $WL_{ta_t,r}$; Área de terreno pantanoso perdido por elevación del nivel del mar, por obras de protección de la costa y total respectivamente, acumulado hasta el año t ,

$WL_{wa_t,r}$, $WL_{pa_t,r}$, $WL_{ta_t,r}$; Área de terreno pantanoso perdido por elevación del nivel del mar, por obras de protección de la costa y total respectivamente, en cada año t ,

$WC_{t,r}$, Costo anual de la pérdida del terreno pantanoso debido a la elevación del nivel del mar

$N_{t,r}$ y $\Delta N_{t,r}$ es el nivel y la variación del nivel del mar en el año t , $\alpha_{w,r}$ el área de terrenos pantanosos perdidos por la elevación del nivel del mar en 1m, WLo_r es el área de terrenos pantanosos perdidos cuando se realiza protección total de la costa y $L_{t,r}$ el perímetro de costa protegido.

El valor del terreno seco $DV_{t,r}$ depende de la densidad del ingreso ρ_y (\$/km²), y la densidad de población en la región $\rho_{Pt,r}$. Se utiliza como referencia el dato promedio para los países de la OECD en 1990 ($DV_0 = \text{M\$ } 4 / \text{ km}^2$) ajustado a otras regiones por los ingresos per cápita.

$$(5-46) \quad DV_{t,r} = DV_0 \rho_{Pt,r} y_{t,r} / \rho_y, \text{ M\$ / km}^2$$

La pérdida de terreno seco anual $DLa_{t,r}$ o total hasta el año t $DL_{t,r}$, se estima como una función lineal del incremento anual o total del nivel del mar ($\Delta N_{t,r}$ o $N_{t,r}$ respectivamente), teniendo en cuenta la longitud de costa protegida $L_{t,r}$ y el área de tierra seca perdida por la elevación del mar en un metro, DL_{1m} , de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$(5-47) \quad DL_{t,r} = DL_{t-1,r} + DL_{1m_r} \Delta N_{t,r} (1 - L_{t,r}), \quad DLa_{t,r} = DL_{1m_r} N_{t,r} (1 - L_{t,r}), \text{ km}^2$$

Donde:

DL_{1m_r} , área de tierra seca perdida por la elevación del mar en un metro.

Finalmente, los costos totales relacionados con las pérdidas de terreno seco se estiman a partir de los resultados anteriores como:

$$(5-48) \quad DC_{t,r} = DV_{t,r} DL_{ta_t,r}, \text{ M\$}$$

5.6.5.5 Impactos en salud humana

El módulo de impactos de FUND se basa en la metodología desarrollada por Tol, Richard (2002a y 2002b), que analiza la influencia de la temperatura (tanto alta como baja) en la morbilidad y mortalidad y la afectación de variaciones en el clima y el tiempo sobre las enfermedades infecciosas transmitidas por vectores.

5.6.5.5.1 Mortalidad cardiovascular y respiratoria

Las afecciones cardiovasculares y respiratorias se agravan durante episodios de calor y frío intenso. FUND parte del trabajo de Martens 1998 que valoró el incremento de la mortalidad asociado a la temperatura en 17 países. Tol extrapoló estos resultados a todos los países según la expresión siguiente ajustando los valores de los parámetros de α y β :

$$(5-49) \Delta M = \alpha + \beta T_B$$

Donde:

ΔM , cambio en la tasa de mortalidad por el aumento en un grado del calentamiento global

T_B , temperatura promedio (más caliente o más fría) en el país.

FUND considera que el aumento de la temperatura sólo afecta a la población urbana mediante:

- disminución en la mortalidad causada por afecciones cardiovasculares relacionadas con el frío, y aumento en las causadas por el calor, diferenciando entre la población mayor y menor de 65 años.
- variación en la mortalidad causada por afecciones respiratorias relacionadas con el calor.

La fracción de la población mayor que 65 años $Fpop_{>65_t,r}$ se considera proporcional a la tasa de incremento de los ingresos con respecto al año base con elasticidad de 0.25.

$$(5-50) Fpop_{>65_t,r} = Fpop_{90>65_r} * \left(\frac{Y_{t,r}}{Y_{90_r}} \right)^{el}$$

La fracción de la población urbana $Fpop_{urb_t,r}$ se estima en función de los ingresos y la densidad de población.

$$(5-51) Fpop_{urb_t,r} = \frac{\alpha \sqrt{Y_{t,r}} + \beta \sqrt{\rho_{pop_t,r}}}{1 + \alpha \sqrt{Y_{t,r}} + \beta \sqrt{\rho_{pop_t,r}}}$$

Luego, el incremento en la tasa de mortalidad se multiplica por la población urbana para las afecciones respiratorias y cardiovasculares causadas por el calor.

Se limita el incremento de la mortalidad debido a la temperatura al 5% del incremento de la mortalidad de base (aquella que no se relaciona con el cambio climático y que se estima a partir del aumento de la población mayor a 65 años). Es decir, si después de realizados los cálculos, el incremento en el número de muertes relacionada con el cambio climático es mayor al 5% del incremento de la mortalidad de base, se asume el 5%. Si es menor se asume el calculado.

5.6.5.5.2 Enfermedades inducidas por vectores: malaria, dengue y esquistosomiasis

La metodología utilizada se basa en los resultados de tres estudios anteriores. Dos de esos estudios sugieren que la relación entre el calentamiento global y la malaria es lineal. Esta relación se asume también para el comportamiento del dengue y la esquistosomiasis.

La vulnerabilidad a este tipo de enfermedades depende de los cuidados básicos de salud y de la posibilidad de la población de acceder a los servicios médicos. Se asume que estos factores dependen linealmente del ingreso per cápita. La ecuación básica para modelar los impactos de mortalidad es la siguiente:

$$(5-52) \quad D_{t,r}^d = \mu_{d,r} * pop_{t,r} * \Delta\mu * T_t^\beta \left(\frac{y_{t,r}}{y_{0,r}} \right)^\gamma, \text{ Casos}$$

Donde:

D , número de muertes adicionales por la enfermedad d (malaria, dengue o esquistosomiasis);

μ , tasa base de mortalidad en 1990;

pop , población;

$\Delta\mu$, cambio en la mortalidad por aumento de la temperatura en 1 °C, fracción de la mortalidad;

T , temperatura media mundial;

β , coeficiente de la función de temperatura, se asume igual a 1 lo que implica un comportamiento lineal del número de muertes con la temperatura;

γ , elasticidad con los ingresos. Se utiliza -2.65 para todas las enfermedades y regiones.

5.6.5.5.3 Diarrea

Se utiliza la siguiente expresión para evaluar los casos de mortalidad por diarrea, relacionados con el cambio climático. En este caso, d identifica la diarrea. Al igual que para las otras enfermedades, es función de la razón de los ingresos per cápita en el año t con respecto al de referencia, 1990, en este caso con elasticidad $\varepsilon = -1.58$ (0.23), la población y de la temperatura. La elasticidad respecto de la temperatura se representa por $\eta = 1.14$ (0.51). Como tasa base se utiliza μ , número de muertes adicionales por cada 10 personas en 1990. La ecuación fue estimada con base en datos de WHO Global Burden of Diseases data.

$$(5-53) \quad D_{t,r}^d = \mu_r^d * pop_{t,r} \left(\frac{y_{t,r}}{y_{0,r}} \right)^\varepsilon (T_{t,r}^\eta - T_{0,r}^\eta), \text{ Casos}$$

La morbilidad por diarrea se evalúa con una expresión similar pero tiene en cuenta los años de vida padeciendo la diarrea YLD_r^d . Los parámetros de elasticidad se asumen como $\varepsilon = -0.42$ (0.12) y $\eta = 0.70$ (0.26).

$$(5-54) \quad Mb_{t,r}^d = YLD_r^d pop_{t,r} \left(\frac{y_{t,r}}{y_{0,r}} \right)^\varepsilon (T_{t,r}^\eta - T_{0,r}^\eta), \text{ Casos}$$

5.6.5.5.4 Mortalidad Total

Los años de vida perdidos, $YLL_{t,r}$, como resultado de todas las enfermedades se calculan multiplicando los años de vida perdidos por cada enfermedad por el número de casos correspondientes.

$$(5-55) \quad YLL_{t,r} = \sum_d YLL_d D_{t,r}^d, \text{ años}$$

El número total de muertes se calcula como la suma de las muertes por cada una de las enfermedades consideradas d (malaria, dengue, esquistosomiasis, diarrea, afecciones cardiovasculares y respiratorias):

$$(5-56) \quad D_{t,r} = \sum_d D_{t,r}^d, \text{ casos}$$

5.6.5.5.5 Morbilidad

Para todos los impactos en la salud, excepto para la diarrea, la morbilidad se considera proporcional a la mortalidad mediante factores que se introducen como datos de entrada (Véase el cuadro 12). Estos representan la razón de los impactos de morbilidad (expresados en años de vida con discapacidades) y los de mortalidad (expresados en número de casos).

Cuadro 12

RAZÓN DE LOS IMPACTOS DE MORBILIDAD Y MORTALIDAD

	Malaria	Esquistosomiasis	Dengue	Afecciones Cardiovasculares	Afecciones Respiratorias
USA	0	0	0	0,96	8,76
CAN	0	0	0	0,96	8,76
WEU	0	0	0	0,96	8,76
JPK	0	0	0	0,96	8,76
ANZ	0	0	0	0,96	8,76
EEU	0	0	0	0,90	11,81
FSU	0	0	0	0,90	11,81
MDE	24,86	51,50	0	1,35	21,81
CAM	4,57	69,00	0	1,25	22,16
SAM	4,57	69,00	0	1,25	22,16
SAS	16,35	0	0,25	1,39	16,51
SEA	3,27	6,00	0,43	1,37	20,05
CHI	0	11,00	0	1,24	8,31
NAF	24,86	51,50	0	1,35	21,81
SSA	3,69	293,75	0	1,33	21,59
SIS	4,57	69,00	0	1,25	22,16

Fuente: Tol, Richard, 2006b.

Los años totales de vida con discapacidades, $YLD_{t,r}$, como resultado de todas las enfermedades se calculan con una expresión similar a la (5-55), utilizando los años de vida con discapacidades asociados a cada enfermedad y el número de casos correspondientes.

5.6.5.5.6 Valoración de los costos en salud

Para valorar la mortalidad se pueden usar cualquiera de los dos enfoques siguientes: valor estadístico de la vida o del valor del año de vida perdido. El modelo asume el valor estadístico de la vida como 200 veces el PIB per cápita, con una desviación estándar de 100 y el valor del año de vida perdido como 10 veces el PIB per cápita, con una desviación estándar de 5.

La morbilidad es valorada como el 80% del PIB per cápita ($0,8 \cdot \text{PIB}$) por año de enfermedad, con desviación estándar de 1.2.

5.6.5.6 Consumo de energía

El ahorro por concepto de calefacción se estima como función del incremento en la temperatura media global con respecto a 1990, ΔT_t , con elasticidad β , 1 (0,5-1,5); de la razón de los ingresos per cápita con respecto a 1990 con elasticidad ε , 0.8 (0.6-1.0); de la razón de la población con respecto a 1990 y de las tasas de incremento de la eficiencia energética desde 1990 hasta el año evaluado, según la expresión:

$$(5-57) \quad SH_{t,r} = \alpha_r \Delta T_t^\beta \left(\frac{y_{t,r}}{y_{0,r}} \right)^\varepsilon \left(\frac{pop_{t,r}}{pop_{0,r}} \right) \prod_{s=1990}^t aeei_{s,r}$$

El gasto adicional por concepto de refrigeración y climatización se calcula con una expresión similar, diferenciadas por el valor del parámetro α_r y de las elasticidades.

5.6.5.7 Recursos hídricos

Los costos del daño por afectaciones a los recursos hídricos como fracción del PIB, $W_{t,r}$, tienen una dependencia lineal de la temperatura pues se asume $\gamma = 1$ (0.5-1.5). Se considera que depende de la razón del PIB, $Y_{t,r}$, con respecto a 1990 con elasticidad $\beta = 0.85$ (0,70 – 1,00). La variable τ incluida en la función se asume igual a 0.005 (0.0-0.010).

$$(5-58) \quad W_{t,r} = \alpha_r (1 - \tau)^{t-1990} \left(\frac{Y_{t,r}}{Y_{0,r}} \right)^\beta T_t^\gamma$$

5.6.5.8 Migración

Se calcula la migración de personas debido al aumento del nivel del mar. La cantidad de inmigrantes depende de la extensión de tierra perdida y de la densidad promedio de habitantes en la región.

La migración de personas se valora como 3 veces el PIB per cápita de la región por inmigrante. Se considera que los costos por inmigrante en la región receptora son 40% del PIB per cápita.

5.6.6 Opciones

Por defecto el programa corre un escenario definido como “escenario FUND”, donde no se implementa ninguna política de reducción de emisiones en ninguna región y para ningún tiempo (escenario BAU), y no se realizan Análisis Costos Beneficio ni Análisis Costo Efectividad.

Manualmente, realizando modificaciones al código fuente y recompilando, ⁶ el usuario puede habilitar otras opciones:

- *Análisis Costos Beneficios, (CBA = True) con y sin cooperación,*
- *Análisis Costo Efectividad, (CEA = True) con y sin cooperación,*

En el Análisis Costos Beneficios, las emisiones son reducidas hasta maximizar la utilidad. En los Análisis Costo Efectividad se analizan diferentes escenarios desde el punto de vista de estabilizar las concentraciones de gases de efecto invernadero minimizando los costos. Los análisis se realizan con base en el valor neto presente de la función de utilidad (*VNPU*) según la expresión:

$$(5-59) \quad VNPU_r = \sum_{t=50}^{350} \frac{W_{t,r}}{(1 + d_r)^t}, \text{ \$/persona}$$

Donde $W_{t,r}$ representa la función de utilidad o beneficio en el año t para la región r y d_r es la tasa de descuento para dicha región. La función de utilidad depende de los ingresos, los costos de reducción y los costos del daño. La expresión para calcularla varía en dependencia de las opciones consideradas. Para las opciones básicas adopta la siguiente forma:

$$(5-60) \quad W_{t,r} = \frac{(Y_{t,r} - Inv_{t,r} - CD_{int,t,r}) - CD_{tan,t,r} - kant_{t,r}}{pop_{t,r}}, \text{ \$/persona}$$

$$(5-61) \quad kant_{t,r} = (Max_t(CD_{tan,t,r}) - CD_{tan,t,r})PIB_{t,r}, \$$$

Donde:

Inv , inversiones o tasa de ahorro, calculada como una fracción de los ingresos totales Y , ($Inv_{t,r} = Cte * Y_{t,r}$) ;

CD_{int} y CD_{tan} , costos del daño, intangibles y tangibles, respectivamente.

⁶ Aunque el programa está escrito en Turbopascal, es compatible con Delphi realizando ligeros cambios, lo que facilita el trabajo con el código fuente al poder trabajar en un ambiente más amigable.

La optimización sin cooperación implica que la reducción de emisiones es tal que cada región (de manera independiente) y cada generación optimiza su beneficio neto presente con perfecto conocimiento de las acciones de las otras regiones y generaciones.

La optimización con cooperación implica que la reducción de emisiones es tal que cada generación optimiza su beneficio neto presente no para cada región por separado sino sobre la base de la suma de los beneficios de todas las regiones, con perfecto conocimiento de las acciones de las otras generaciones.

El programa puede correr también aplicando medidas de reducción de emisiones: a través de impuestos o de reforestación. Los valores deben introducirse en el fichero cea.out.

Pueden habilitarse otras opciones de análisis:

- Aversión al riesgo de cambio climático: variable *riskave* $\diamond 1$
- Aversión a la inequidad: variable *ineqave* $\diamond 1$ y $\diamond 0$
- Método de Kant para considerar la eficiencia y la equidad simultáneamente: variable *kantian* = *True*
- Compensaciones entre regiones teniendo en cuenta las emisiones acumuladas (Tol, R.S.J., 2001): variable *compens* = *True*. En este caso los ingresos anuales Y en cada región son afectados por la fracción que representan las emisiones acumuladas en la región Em con respecto a las emisiones totales, así como por los costos del daño para el año y la región.

$$(5-62) \quad Y_{t,r} = Y_{t,r} (1 + CD_{t,r} + CD_{i,t,r}) - CD_{t,r} \frac{Em_{t,r}}{Em_t}, \text{ B\$}$$

- Análisis de incertidumbres por Monte Carlo (variables *uncertain* = *True*; runs $\diamond 0$) (Tol, Richard, 2003)

5.6.7 Costos marginales

Si se habilita el módulo *MargMain* en lugar de *Main* y se recompila, el programa permite calcular los costos marginales de cada tonelada de CO₂ utilizando diferentes criterios de agregación y esquemas de descuento.

Si se utiliza la agregación por ingresos entonces los costos marginales, CM , se calculan como función de los daños marginales, DM , y del descuento, $dfx_{t,r}$, para todo el período evaluado mediante la suma para todas las regiones de acuerdo con la siguiente expresión:

$$(5-63) \quad CM = \sum_{t=50}^{350} \sum_{r=1}^{16} DM_{t,r} dfx_{t,r}, \text{ \$/ton C}$$

Los daños marginales se estiman como la diferencia en la fracción de los costos de daños CD con respecto al PIB total $Y_{t,r}$, para dos niveles de emisiones, expresados como 0 y 1 en la ecuación siguiente.

$$(5-64) \quad DM_{t,r} = (CD_{1t,r} - CD_{0t,r}) Y_{1t,r}, \text{ B\$}$$

Si se realiza una ponderación equitativa, proporcional a la población (pop_r), e inversamente proporcional a los ingresos (Y_r) de las regiones con respecto a los del mundo (pop_G , Y_G respectivamente), la expresión es la siguiente:

$$(5-65) \quad CM = \sum_{t=50}^{350} \frac{Y_{Gt}}{pop_{Gt}} \sum_{r=1}^{16} DM_{t,r} dfx_{t-1,r} \frac{pop_{1t,r}}{Y_{1t,r}}, \text{ \$/ton C}$$

En ambos casos $dfx_{t,r}$ representa los diferentes esquemas de descuento posibles. Por ejemplo, cuando la tasa de preferencia temporal pura es de 1%, se calcula como:

$$(5-66) \quad df1_t = \frac{df1_{t-1,r}}{1 + 0.01 + g_{t,r}}$$

Además del esquema de descuento representado por la expresión anterior, se utilizan otros dos con tasas de preferencia temporal pura de 0% y 3% y otros tres esquemas mucho más complejos, descritos en el cuadro 13, para un total de seis esquemas de descuento posibles.

En la expresión anterior g representa la tasa anual de crecimiento económico, y se calcula de la forma siguiente:

$$(5-67) \quad g_{t,r} = \frac{\frac{Y_{1t,r}}{pop_{1t,r}} - \frac{Y_{0t,r}}{pop_{0t,r}}}{\frac{Y_{0t,r}}{pop_{0t,r}}}$$

5.7 Salidas de FUND

El modelo tiene 17 ficheros.txt con los siguientes resultados:

5.7.1 Resumen de las condiciones ambientales globales por año, (climate.out)

- Concentración de CO₂ en la atmósfera
- Concentración de CH₄ en la atmósfera
- Concentración de N₂O en la atmósfera
- Emisiones de SO₂
- Forzamiento radiactivo
- Elevación de la temperatura
- Diferencia de temperatura
- Nivel del mar

Cuadro 13

ESQUEMAS DE DESCUENTOS (Guo Jiehan y otros, 2006)

Nombre del esquema	Implementación														
Green Book	<p>Emplea una tasa de descuento global para cada año después del 20, que va disminuyendo de acuerdo con el esquema de declinación por pasos propuesto por UK GreenBook:</p> <table> <tr> <th>Período</th><th>Tasa de descuento Greenbook</th></tr> <tr> <td>0–30, t<2030</td><td>3,5</td></tr> <tr> <td>31–75, t<2075</td><td>3,0</td></tr> <tr> <td>76–125, t<2125</td><td>2,5</td></tr> <tr> <td>126–200, t<2200</td><td>2,0</td></tr> <tr> <td>201–300, t<2300</td><td>1,5</td></tr> <tr> <td>301+</td><td>1,0</td></tr> </table> $dfu_{t,r} = \frac{dfu_{t-1,r}}{1 + greenbook}$	Período	Tasa de descuento Greenbook	0–30, t<2030	3,5	31–75, t<2075	3,0	76–125, t<2125	2,5	126–200, t<2200	2,0	201–300, t<2300	1,5	301+	1,0
Período	Tasa de descuento Greenbook														
0–30, t<2030	3,5														
31–75, t<2075	3,0														
76–125, t<2125	2,5														
126–200, t<2200	2,0														
201–300, t<2300	1,5														
301+	1,0														
Weitzman	<p>Emplea una tasa de descuento global para cada año después del 2000, que varía de acuerdo con el esquema de declinación por pasos propuesta por Weitzman (2001)</p> $dfw_{t,r} = \frac{dfw_{t-1,r}}{1 + \frac{0.375}{12.5 + t - 50} + g_r}$														
Gamma	<p>Emplea una tasa de descuento global para cada año después del 2000, que varía de acuerdo con una distribución gamma continua propuesta por Weitzman (2001)</p> $dfg_{t,r} = \frac{dfg_{t-1,r}}{1 + \left(0.01 \frac{1 + 49 * 2.713^{-0.06(t-50)}}{1 + 7 * 2.713^{-0.06(t-50)}} \right) + g_r}$														

Fuente: Guo Jiehan, y otros, 2006.

5.7.2 Resumen de daños, valores anuales (damage.out)

- Elevación de la temperatura
- Daños totales: suma de costos tangibles e intangibles multiplicado por el ingreso. Valor acumulado que incluye al año anterior
- PIB
- Daños totales / PIB

5.7.3 Resumen de resultados (summary.out)

- Políticas, por regiones
 - Impuestos (Tax)
 - Reducción de emisiones por reforestación
- Beneficios, por regiones
 - NPVW: Beneficio neto presente (net present value welfare)
 - P: población, millones
 - PIB: billones
 - Ingresos per cápita
- PIB del año 90 por regiones
- Emisiones de CO₂ del 2000 al 2300, cada 25 años

5.7.4 Impactos en salud, por años y regiones

- Cambio en la mortalidad cardiaca tanto por stress de calor como por stress de frío, para todas las regiones entre 1950–2300, (cardio.out)
- Cambio en la mortalidad por problemas respiratorios, (respir.out)
- Muertes adicionales por esquistosomiasis, (schisto.out)
- Muertes adicionales por dengue, (dengue.out)
- Casos adicionales de malaria por regiones, (malaria.out)

5.7.5 Costos / Ingresos, por años y regiones

- PIB por regiones, (income.out)
- Pérdidas tangibles en: eloss.out
 - agricultura,
 - silvicultura,
 - energía usada para refrigeración y climatización y calentamiento,
 - recursos hídricos
 - protección de las costas,
 - tierras secas inundadas
 - arribo de inmigrantes
- Pérdidas intangibles en: slloss.out
 - mortalidad y morbilidad (salud),
 - afectación a especies,
 - terrenos pantanosos perdidos
 - migración por inundaciones
- Costos marginales, (margcost.out)

5.7.6 Población / Emisiones, por años y regiones

- Emisiones relacionadas con la energía, (emission.out)
- Migración entre regiones: Leave.out, enter.out
- Población, (Population.out)

5.7.7 Salidas con otras opciones no habilitadas por defecto

5.7.7.1 *Análisis Costos Beneficios, ACB (con y sin cooperación), Análisis Costo Efectividad, ACE (sin cooperación)*

- ficheros seq#.out,
- N° período (Fila) / Regiones (columnas)
 - Impuestos (tax)
 - Reducción de CH₄;
 - Reducción de N₂O;
 - Reducción de emisiones por reforestación

5.7.7.2 ACE (con cooperación)

- Fichero cea.out
- N° período (Fila) / Regiones (columnas)
 - Impuestos (tax)
 - Reducción de emisiones por reforestación

5.7.7.3 Costos marginales

- 'margunc.out': Resultados globales usando 6 criterios diferentes de descuento y dos criterios de agregación de resultados
- 'regmarg.out': Valor neto presente de los daños marginales en todas las regiones.

5.7.7.4 Incertidumbres

- Variables por regiones (columnas) y por corrida (las filas representan diferentes corridas)
 - welfunc.out, valor neto presente del beneficio,
 - desde el 2000 al 2300, cada 25 años para cada corrida,
 - concunc.out, columnas: concentraciones de CO₂
 - 'tempunc.out', temperatura
 - 'popunc.out', población
 - 'incunc.out', ingresos
 - 'impunc.out', costos del impacto
 - 'emmunc.out', emisiones
 - 'redunc.out', costos de reducción/PIB

5.8 Implementación del modelo

El modelo FUND está escrito en Turbo Pascal, pero es completamente compatible con Delphi 6.0. No posee interfaz gráfica, y de hecho resulta muy poco amigable:

- no posee Manual o Guía de usuario,
- no hay una descripción de los datos de entrada ni de los resultados que aparecen en los ficheros de salida
- para habilitar las diferentes opciones que permite el programa, el usuario debe realizar modificaciones directamente al código fuente, las cuales no están indicadas en ningún documento
- algunos cálculos importantes que realiza el programa no aparecen en los ficheros de resultados.

6. VALORACIÓN COMPARATIVA

Los resultados de los modelos son difíciles de comparar pero, no obstante, se puede arribar a un grupo de conclusiones generales:

- Hasta 2–3 °C de calentamiento hay diferencias en cuanto a si el impacto global del cambio climático será positivo o negativo. No obstante, incluso a estos niveles de calentamiento relativamente bajos, resulta claro que cualquier beneficio es temporal y específico de los países ricos, mientras los países pobres sufren costos significativos. Por ejemplo, FUND estima un costo para África de 4,1% del PIB para 2,5 °C de calentamiento, muy cercano al valor de 3,9% obtenido por RICE.
- Al aumentar la temperatura por encima de 2–3 °C, los modelos coinciden en que se reducirá el consumo global. Sin embargo, discrepan en la magnitud de este costo, oscilando entre una fracción muy pequeña del PIB global y un 10% o más. También, en este rango los modelos están de acuerdo en que los países pobres sufrirán los costos más altos, aunque el modelo RICE prevé que con calentamientos de 6° C, el costo estimado para Europa Occidental es elevado y solamente superado por África.

La figura 3 muestra algunos resultados obtenidos por estos tres modelos para diferentes escenarios y criterios de agregación de los resultados.

- El FUND obtiene que el incremento inicial de la temperatura pudiera producir beneficios netos globales. Como estos beneficios se producirán en los países ricos, el método de agregación utilizado entre las regiones resulta de importancia vital para estimar adecuadamente la magnitud del beneficio global. Si la agregación se realiza sin ponderar, los beneficios globales ascienden a alrededor del 2,5% del PIB global para un calentamiento de 0,5 °C por encima del valor de temperatura correspondiente a la era preindustrial. En cambio, si los resultados son ponderados equitativamente de acuerdo con los ingresos per cápita y la población, los beneficios globales ascienden tan solo al 0,5% del PIB global para el mismo incremento de 0,5°C en la temperatura.

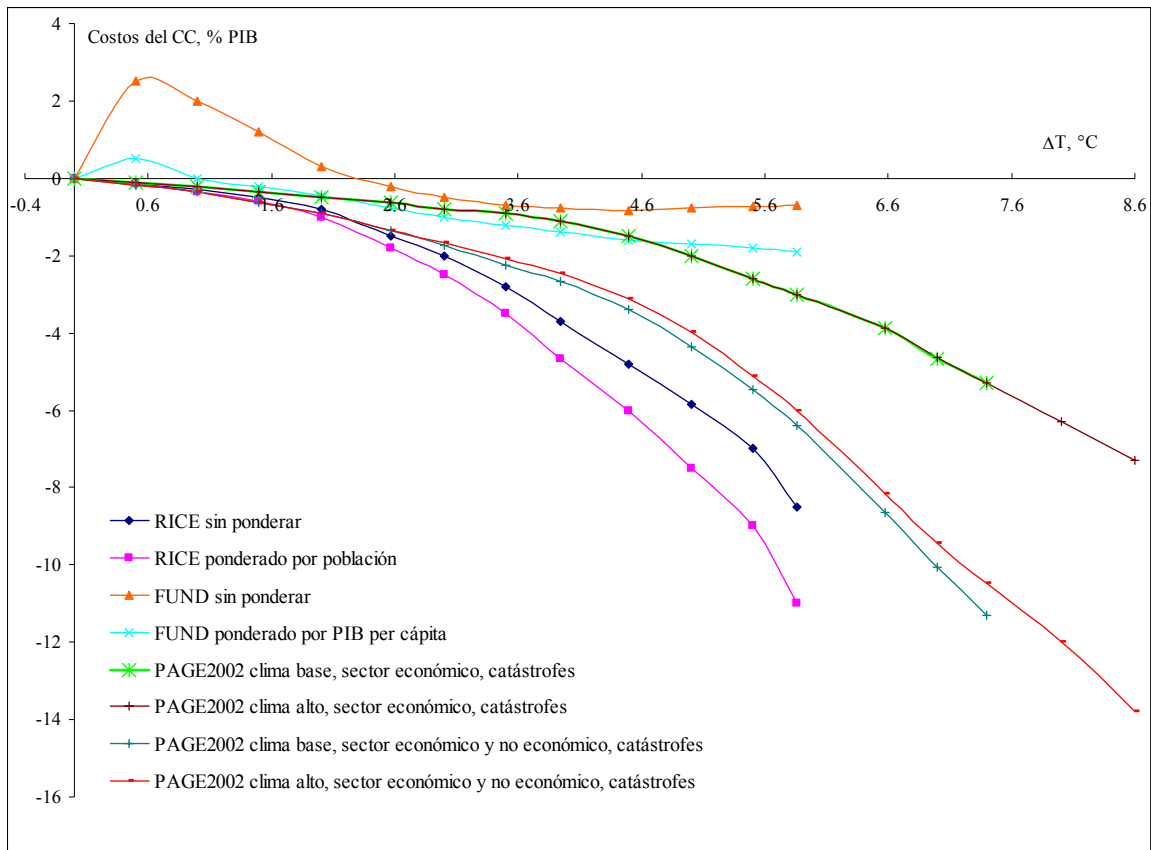
Los impactos globales son negativos por encima de 1 °C de calentamiento (si los costos son ponderados equitativamente) o de 2–2,5 °C (si los costos no son ponderados), y alcanzan entre 0,5% y 2% del PIB global para incrementos más altos de la temperatura media.

- El modelo RICE obtuvo que para un calentamiento de 6 °C, los costos del cambio climático oscila entre 9% y 11% del PIB global, dependiendo de si los impactos regionales son agregados sin ponderar (límite inferior) o ponderados por población (límite superior).
- En el estudio Stern, el modelo PAGE2002, evaluando dos escenarios de evolución del clima: (base y alto), con dos posibles efectos de retroalimentación del clima (debilitamiento de los sumideros de carbón e incremento de las emisiones naturales de metano), y dos criterios en la

evaluación de los costos (tener en cuenta sólo los costos del sector económico o incluir además el sector no económico), estimó para el 2200 aumentos de la temperatura hasta 7,4 °C y 8,6 °C para los escenarios base y alto del clima respectivamente. Los costos pueden ascender hasta 5% – 7% del PIB y 11% – 13% si se consideran o no los impactos intangibles.

Figura 3

**COSTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN FUNCIÓN DEL INCREMENTO DE LA TEMPERATURA
CALCULADOS POR LOS TRES MODELOS PARA DIFERENTES ESCENARIOS Y CRITERIOS DE
AGREGACIÓN DE LOS RESULTADOS**



Fuente: Elaboración propia basada en Smith y otros (2001).

El siguiente cuadro muestra una comparación resumida de aspectos importantes de los modelos analizados que deben ser considerados al utilizarlos.

Cuadro 14

VALORACIÓN COMPARATIVA DE LOS MODELOS PAGE2002, RICE y FUND

	PAGE2002	RICE	FUND
Recursos informáticos			
Lenguaje de programación	Excel	Excel, GAMS ⁷	Turbopascal, compatible con Delphi
Requerimientos de otros software	@risk ⁸	GAMS	Ninguno
Interfase	Amigable	Versión sobre GAMS no amigable; la versión de Excel es más amigable pero poco flexible.	Definitivamente no amigable (Véase explicación en 0)
Manual / Guía de usuario	No	Si	No
Disponibilidad	No	Si	Si
Generalidades			
Regiones	8, por área geográfica	8, atendiendo a criterios de similitud en cuanto a las condiciones políticas o económicas	16, por áreas geográficas
Tiempo	2000–2200, el tamaño del paso es variable, aumenta en el tiempo.	1995–2335, con paso de 10 años	1950–2300, paso anual
Contaminantes	CO ₂ , CH ₄ y SF ₆	Sólo calcula el CO ₂ proveniente de fuentes industriales. El CO ₂ proveniente de cambios en el uso de la tierra y los otros GEI son considerados exógenos	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O SF ₆ en desarrollo Considera emisiones de SO ₂ en el cálculo del forzamiento radiactivo
Emisiones	Calcula las emisiones naturales, antropogénicas, totales y acumuladas, a partir de los incrementos de temperatura, escenarios de emisiones antropogénicas por región, parámetro con incertidumbres obtenidos del ciclo del carbón, etc.	Calcula las emisiones de modo que satisfagan una condición de primer orden para la optimización de la producción (versión Excel) o las considera como variables de control (versión GAMS)	Calcula emisiones antropogénicas con base en los datos anuales de población y el crecimiento económico, eficiencias energéticas y de carbón, y otros datos adicionales
Concentraciones de GEI	Estimadas a partir de las emisiones calculadas que permanecen en la atmósfera, la concentración preindustrial y los excesos de concentración en el año base	Calcula las concentraciones de CO ₂ a partir de las emisiones usando el modelo de tres reservorios	Calculadas por el programa a partir de las emisiones. Modelo de las 5 cajas para CO ₂

⁷ Copyright © 2007 GAMS Development Corporation, Washington, DC, USA.

⁸ Copyright © 2008 Palisade Corporation, (<http://www.palisade.com>).

	PAGE2002	RICE	FUND
Variables climatológicas			
Forzamiento radiactivo, FR	Calculado para los tres gases de estudio y aerosoles de sulfatos.	Calculado por el programa para CO ₂ industrial, con un término que engloba el FR de los otros GEI y el CO ₂ proveniente de cambios en el uso de la tierra	Calculado por el programa para CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O y SO ₂
Temperatura	Calculada por el programa con base en el FR	Calculada por el programa con base en el FR	Calculada por el programa con base en el FR
Nivel del mar	No	No	Calculado por el programa con base en la Temperatura
Precipitaciones	No	No	No
Impactos			
Tangibles (mercado)	Sin diferenciar sectores expresados como costos	Considera los siguientes impactos expresados como costos y sin desagregar: la agricultura, elevación del nivel del mar (costos de tormentas, tierras inundadas y reubicación de asentamientos humanos), silvicultura, consumo de energía y agua, construcción, pesca, y actividades recreativas al aire libre)	Agricultura, silvicultura, energía usada para refrigeración y climatización y calefacción, recursos hídricos, protección de las costas, tierras secas inundadas, arribo de inmigrantes
Intangibles (No mercado)	Sin diferenciar sectores expresados como costos	Considera los siguientes impactos expresados como costos y sin desagregar: salud, impactos al confort no incluidos en el mercado, asentamientos humanos y ecosistemas	Mortalidad y morbilidad (salud), especies, terrenos pantanosos perdidos, migración por inundaciones
Eventos extremos	Calcula las discontinuidades futuras o sucesos singulares a gran escala cuando la temperatura se eleva por encima de un nivel tolerable.	Calcula el daño por incremento de los eventos extremos (catástrofes) lineal con los incrementos de temperatura de hasta 3 °C y potencial por encima de este límite.	Versión en desarrollo no disponible para modelar el debilitamiento de la THC (Circulación Termohalina)
Efectos de reforzamiento al cambio climático	Alteración de la tasa de absorción de carbón por las plantas e incremento de las emisiones naturales de metano al derretirse el permafrost	No se consideran	No se consideran
Valoración económica			
Costos de reducción de emisiones	No se calculan	No se calculan	Son calculados por el programa y considerados en los resultados pero no aparecen directamente en los ficheros de salida
Costos del daño	Para los impactos económicos y no económicos ponderados por el % de pérdida de PIB en cada región y sector como resultado de elevarse la temperatura 2,5 C	Para los impactos considerados, pero desagregados sólo en daños en los sectores económico y no económico	Para los impactos considerados

	PAGE2002	RICE	FUND
Costos marginales	Calculados a partir de la diferencia en los resultados entre dos escenarios, uno base y otro perturbado por la disminución de las emisiones en el año base, utilizando una tasa pura de preferencia de tiempo. Sólo es posible utilizar una tasa de descuento variable en el tiempo.	Se calculan los costos marginales del incremento de la temperatura y a partir de estos los costos marginales por tonelada métrica de carbono, teniendo en cuenta la voluntad a pagar. Se considera que los costos marginales de mitigación serán iguales en aquellas regiones que enfrenten un mismo impuesto a las emisiones de carbono.	Calculados para 6 esquemas de descuento, con dos criterios de agregación
Opciones de análisis	Con y sin política de adaptación.	Se pueden modelar los resultados de diferentes políticas (BAU – caso base – y variantes de una política óptima, limitaciones a variables ambientales y salto tecnológico de gran magnitud), así como comparar los resultados con el caso base (véase 4.5) Las opciones consideradas (con cooperación, considerando en alguna medida la aversión a la desigualdad y la aversión al riesgo del cambio climático, entre otras) están fijas aunque pudieran modificarse en algunos casos.	Análisis Costo–Beneficio y Análisis Costo–Efectividad; con y sin cooperación, Aversión al riesgo del cambio climático, Aversión a la inequidad, Método de Kant para considerar la eficiencia y la equidad simultáneamente. Uso de compensaciones
Adaptación	Calcula los costos de adaptación por región. Considera los incrementos de la tasa de cambio y del nivel tolerable de incremento de la temperatura como resultado de la adaptación. Calcula de forma independiente los costos de adaptación preventiva (prevención) basados en la reducción de emisiones con respecto al escenario BAU y los costos de prevención de la región de referencia.	Considera que hay adaptación, en particular para la agricultura, pero esta no se modela explícitamente sino que se considera en la función de daño.	Algunos impactos dependen del impacto del año anterior. Considerada explícitamente en los impactos a la agricultura
Agregación de resultados	Descontados y agregados sin ponderar	Opciones sin ponderación, con ponderación proporcional a la población y/o producción.	Ponderación por ingresos y ponderación equitativa proporcional a la población e inversamente proporcional a los ingresos de las regiones con respecto a los del mundo
Análisis de incertidumbre	Monte Carlo, muestreo Hipercubo Latino	No	Monte Carlos, muestreo aleatorio
Aplicación conocida	Estudio Stern	TIE del IPCC, Estudio Stern	ExternE 2005, Estudio Stern, TIE del IPCC

Fuente: Elaboración propia

7. CONCLUSIONES

Los modelos integrados de valoración del cambio climático (MIVCC) que fueron analizados, integran los aspectos económicos, ambientales y de política que resultan más importantes. Ello comprende desde los aspectos relativos a las emisiones hasta aquellos asociados al cálculo de los impactos físicos y económicos, con diferentes grados de detalle y opciones de análisis. En consecuencia, estos modelos constituyen, indiscutiblemente, una herramienta muy útil para los investigadores. Sus resultados son especialmente valiosos para una toma de decisiones bien fundamentada.

Los parámetros, expresiones, metodologías, etc., empleados en los modelos han sido calibrados de acuerdo con los resultados de numerosas investigaciones científicas y económicas. Los modelos, en realidad, resumen las conclusiones de estos estudios precedentes y pueden fácilmente incorporar los resultados más recientes.

No es posible emitir conclusiones sobre la superioridad absoluta de un modelo con respecto a los restantes. Cada uno tiene sus fortalezas y debilidades y sus resultados son comparables si las condiciones de análisis son similares. Solamente el FUND estima impactos físicos por tipos, mientras que el PAGE y el RICE consideran los impactos expresados como costos y sin desagregar.

La metodología en que se basa el PAGE2002 es la más sencilla de los tres modelos analizados. Su fortaleza radica en el empleo del método de Monte Carlo con técnica de muestreo Hipercubo Latino para el tratamiento de las incertidumbres, dando los resultados no como un valor único sino como un rango. Es posible modificar los valores estadísticos de los parámetros con incertidumbres que emplea, siempre que se realice cuidadosamente y sobre una base científica. Permite además el modelado de eventos extremos (discontinuidades) a gran escala como consecuencia del aumento de la temperatura por encima de valores donde no es posible una adaptación. Considera, adicionalmente, efectos de reforzamiento al cambio climático. Analiza ocho regiones, las cuales pueden ser definidas por el usuario. El modelo es muy flexible para analizar diferentes escenarios; las aplicaciones más conocidas de este modelo han evaluado los escenarios del IPCC, pero el usuario puede definir su propio escenario. El usuario también puede establecer la política de adaptación.

Desde el punto de vista de los impactos, PAGE2002 no desagrega los impactos por sectores, sólo calcula impactos tangibles e intangibles. Adicionalmente el modelo no está disponible libremente, así como tampoco la herramienta @risk utilizada para el tratamiento de las incertidumbres, imprescindible para obtener los resultados.

La fortaleza del modelo RICE está en el análisis económico, considerando los impactos físicos relacionados con el cambio climático de forma más simplificada que FUND y comparable a PAGE2002 y reflejándolos a través de su influencia en la economía a través de los costos y daños asociados. Resulta potente para la evaluación de políticas, permitiendo la evaluación de los costos de su implementación (como la diferencia en el PIB con respecto a la no implementación o

BAU) y los costos del daño provocados por el cambio climático. La evaluación de políticas tales como el protocolo de Kyoto, concentraciones o temperatura no superiores a un cierto valor o una variante óptima según Pareto, puede realizarse directamente o con esfuerzo mínimo. En cuanto a la evaluación del daño, el modelo la simplifica, relacionando todos los daños con el aumento de la temperatura según una función determinada a partir de los estudios existentes, en la cual intervienen los daños por sectores tanto tangibles como intangibles (en términos de la *voluntad a pagar* para evitarlos). Sólo se calcula el CO₂ proveniente de fuentes industriales, incluyendo en un único término del forzamiento radiactivo total el efecto de los demás GEI y de los aerosoles de sulfato, así como del CO₂ antropogénico proveniente de cambios del uso de la tierra; este término se estima a partir de estudios existentes. No se realiza un análisis riguroso de las incertidumbres involucradas en el modelo, aunque se señalan los factores que más contribuyen a las mismas.

Desde el punto de vista de su implementación para América Central, el modelo presenta la dificultad de que los países comprendidos no están agrupados bajo una única región geográfica. Considerando que la agregación en regiones responde al desarrollo económico y no a la cercanía geográfica, la posibilidad de crear una región con los países del área no parece factible. Una alternativa relativamente simple pudiera ser estimar la proporción de costo o daño correspondiente a los países de interés dentro de sus respectivas regiones atendiendo a la proporción de PIB correspondiente u otro criterio de ponderación. Otra variante es desagregar las regiones que incluyen algunos de estos países, y luego agrupar los resultados para las subregiones resultantes de interés; un cambio de esta magnitud no puede realizarse sobre la versión en Excel.

Aunque RICE/DICE tiene una implementación en Excel, la implementación más potente es la de GAMS, y se necesita una licencia de uso extendida para poder disponer de toda la potencialidad de los “solver” que resuelven la programación no lineal.

Desde el punto de vista de la resolución regional, el modelo FUND es adecuado para ser aplicado en estudios que vinculen a México y a los países de Centro América por cuanto define una región que los agrupa. Otra característica positiva de este modelo es la posibilidad de desarrollar una versión del FUND para cada país, lo que permitiría modelar estudios de mitigación a escala nacional con la ayuda de este modelo.

La resolución temporal del FUND también es la más detallada, al utilizar pasos anuales durante 350 años. Esto por una parte representa un mayor grado de detalle en los resultados, pero a su vez exige mayores esfuerzos en el procesamiento de los datos de entrada que deben ajustarse a este requerimiento.

FUND incluye los tres GEI más importantes (CO₂, CH₄ y N₂O) y está en desarrollo una versión que incluya el SF₆. FUND también tiene la ventaja de calcular de forma independiente los impactos en diferentes sectores: salud humana desagregada por varias enfermedades y diferenciando los casos de mortalidad y morbilidad, ecosistemas y especies, agricultura, silvicultura, consumo de energía y recursos hídricos, impactos debido a la elevación del nivel del mar y migración.

Este modelo permite también la valoración de escenarios mediante análisis costo–beneficio y costo–efectividad, considerando múltiples opciones: con y sin cooperación, teniendo en cuenta o no la aversión al riesgo y a la inequidad, la compensación entre regiones por las

emisiones acumuladas, etc. Pero para habilitar estas opciones hay que identificar las modificaciones a realizar en el código fuente directamente y recompilar el programa, lo que no está al alcance de cualquier usuario. El análisis de políticas debe hacerse a través de la selección de un escenario que obedezca a dicha política o mediante su creación en caso de no existir ninguno. Esto es teóricamente posible pero puede resultar bastante complejo. FUND tiene la posibilidad de realizar análisis de incertidumbres por el método de Monte Carlo, habilitando esta opción directamente en el código fuente. Por otra parte, tiene la ventaja de que el código fuente está disponible en calidad de “código libre” y se puede introducir cualquier modificación que se desee. Al ser desarrollado con un lenguaje de programación de uso general, no necesita ningún otro software específico.

ANEXO 1

UNIDADES DE MEDIDA, PREFIJOS, FACTORES DE CONVERSIÓN Y EQUIVALENCIAS

Abreviaturas

año	a
década	déc
bytes	b
metro	m
metro cuadrado	m ²
gramo	g
tonelada	ton
grados Celcius	° C
porcentaje	%
Partes por millón	ppm = 10 ⁻⁶
Partes por billón	ppb = 10 ⁻⁹
per cápita	cap
Watt	W
Dólar de Estados Unidos	\$

Prefijos y Factores usados

Factor de Multiplicación	Prefijo	Abreviatura	Símbolo
1 000 000 000 000	Tera – Trillón	10 ¹²	T
1 000 000 000	Giga – Billón	10 ⁹	G – B
1 000 000	Mega – Millón	10 ⁶	M
1 000	Kilo	10 ³	k

Nomenclatura de elementos químicos

C	Carbono
CFC	Clorofluorocarbonos
CO ₂	Dióxido de Carbono
CO ₂ e	Dióxido de Carbono equivalente
CH ₄	Metano
N ₂ O	Óxido Nitroso
SF ₆	Hexafluoruro de Azufre
SO ₂	Dióxido de Azufre

ANEXO 2

GLOSARIO DE TÉRMINOS Y ABREVIATURAS

Abreviaturas

AEEI	del inglés Autonomous Energy Efficiency Improvement
ACEI	del inglés Autonomous Carbon Efficiency Improvement
BAU:	del inglés Business As Usual
DICE:	del inglés D ynamic I ntegrated model of C limate and the E conomy
ECU:	del inglés European Current Unit
FUND:	del inglés Climate F ramework for U ncertainty, N egotiation and D istribution
GEI:	Gases de Efecto Invernadero
IAM:	del inglés Integrated Assessment Models
IPCC:	del inglés International Panel on Climate Change
MIVCC:	Modelos Integrados de Valoración del Cambio Climático
OECD:	Países pertenecientes a la Organización para la Cooperación Económica y el Desarrollo, de sus siglas en Inglés
PAGE2002:	del inglés P olicy A nalysis of the G reenhouse E ffect 2002
PIB:	Producto Interno Bruto
RICE:	del inglés R egional dynamic I ntegrated model of C limate and the E conomy
WTP:	del inglés Willingness To Pay

Términos

Cambio tecnológico neutral tipo Hick	Es aquel cambio que no afecta el balance entre la fuerza laboral y el capital en la función de producción. Más formalmente, dada la función de producción $Y = A * F(K, L)$, un cambio tecnológico neutral tipo Hick sólo modifica a A .
Condición de Samuelson para los bienes públicos	<p>Es una condición para la provisión eficiente de bienes públicos, cuando esta condición se cumple, implica que posteriores sustituciones de provisiones de bienes privados por provisiones de bienes públicos (o viceversa) resultan en una disminución de la utilidad social. Para una economía con n consumidores, si MRS_i es la tasa marginal de sustitución de i y MRT es la tasa marginal de transformación de la economía entre un bien público y un bien privado cualquiera, entonces $\sum_{i=1}^n MRS_i = MRT$.</p> <p>La <i>tasa marginal de transformación de la economía entre un bien público y un bien privado cualquiera</i> describe numéricamente la tasa a la cual un bien puede transformarse en otro y puntualmente es la pendiente de un gráfico que muestra las diferentes cantidades de esos dos bienes que una economía puede producir eficientemente con recursos productivos limitados (frontera de posibilidades de la producción o curva de transformación para esos dos bienes). La <i>tasa marginal de sustitución</i> es la tasa a la cual un consumidor está dispuesto a intercambiar un producto A por uno B manteniendo la satisfacción total.</p>

Discontinuidad	Cambios a gran escala en los sistemas de la Tierra debido al cambio climático inducido por la actividad humana, que podrían tener consecuencias graves a nivel regional o mundial. Entre los sucesos de este tipo figuran: la desintegración de las capas de hielo de la Antártica occidental y de Groenlandia, y perturbaciones importantes en las dinámicas del carbono reguladas por la biosfera.
Forma funcional Cobb–Douglas	Para la producción esta función toma la forma $Y = AL^\alpha K^\beta$, donde K es el capital total, L la fuerza laboral o trabajo total, Y es el producto y A , α , β son constantes determinadas por la tecnología. Si $\alpha + \beta = 1$, la función de producción tiene <i>rendimientos constantes a escala</i> , esto implica que si L y K son incrementadas en un 20%, Y se incrementa en un 20%.
Impuestos pigouvianos	Son aquellos impuestos que se recaudan para corregir las externalidades negativas de una actividad de Mercado.
Muestreo Hipercubo Latino	Traducción del término en inglés, Latin Hypercube Sampling. Técnica de muestreo estadístico del método de Monte Carlo que se utiliza en el tratamiento de las incertidumbres.
Mejora de Pareto	Dado un conjunto de distribuciones alternativas de, por ejemplo, bienes o ingresos, para un conjunto de individuos, el cambio de una distribución a otra que consigue que al menos un individuo se beneficie sin que ningún otro individuo se perjudique se dice que es una <i>mejora de Pareto</i> . Una distribución es <i>óptima de Pareto</i> o eficiente según Pareto cuando no pueden realizarse más mejoras de Pareto.
Permafrost	Parte profunda del suelo que permanece siempre helada en las regiones muy frías
Productividad total de factores (PTF)	Recoge cualquier efecto en la producción total no causado por los factores de producción (capital y fuerza laboral, etc.). Un ejemplo es la influencia del clima en la producción agrícola. El crecimiento tecnológico y la eficiencia se señalan como dos de las contribuciones más importantes a la PTF. En la función Cobb–Douglas, el término A .
Rentas de Hotelling o renta de escasez	Es la renta máxima que puede obtenerse mientras se agota un recurso natural no renovable.

BIBLIOGRAFÍA

- Ahmad Q.K. y otros (2001), "Methods and Tools", *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability, Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge: Cambridge University Press pp 105-144.
- Andreae, I M. (2001), *Climate change 2001, The Scientific Basis, Chapter 5, Aerosols, their Direct and Indirect Effects*.
- European Commission, ExternE (2005), "Externalities of energy: Methodology 2005 update", (EUR 21951), Directorate-General XII, Science Research and Development, Office for Official Publications of the European Communities, L-2920 Luxembourg, F75272, Paris, Cedex 06, France.
- _____ (1995), *ExternE: Externalities of Energy*, Directorate-General XII, Science Research and Development, vol.2 Methodology, Bruxelles: EC.
- Guo Jiehan; Cameron J.B Hepburn.; S.J. Richard Tol; David Anthoff (2006), "Discounting and the social cost of carbon: a closer look at Uncertainty", *Environmental science & policy* 9, pp. 205 – 216.
- Hope, Chris (2006), "The Marginal Impact of CO₂ from PAGE2002: An Integrated Assessment Model Incorporating the IPCC's Five Reasons for Concern", IAJ, *The Integrated Assessment Journal*, Bridging Sciences & Policy, Vol. 6, Iss. 1 (2006), pp. 19–56.
- IPCC (International Panel on Climate Change) (2001a), *Climate change 2001, Impacts, Adaptation and Vulnerability*, Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.
- _____ (2001b), *Climate change 2001, The Scientific Basis*, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.
- Koopmans, Tjalling (1967), "Objectives, Constraints, and Outcomes in Optimal Growth Models", *Econometrica*, Vol. 35, pp. 1-15.
- Nordhaus, William, (2006), *RICE and DICE Models of Economics of Climate Change*, Yale University: Spreadsheet Versions of DICE-99 and RICE-99 models, (http://www.econ.yale.edu/~nordhaus/homepage/dice_section_III.html).
- Nordhaus, William y Boyer, (1999), *Roll the DICE Again: Economic Models of Global Warming*, web 102599.wpd.

Ramsey, Frank P. (1928), "A mathematical theory of saving", *The Economic Journal*, December, 543-559.

Smith, J.B. y otros (2001), "Vulnerability to climate change and reasons for concern: a synthesis", *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability*, Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press pp 913-967.

Stern, Nicholas (2007), *The Economics of Climate Change: The Stern Review*, Cambridge: Cambridge University Press (disponible on-line en (http://www.hm-treasury.gov.uk/independent_reviews/stern_review_economics_climate_change/stern_review_report.cfm)).

The IMAGE 2 Hundred Year (1890-1990), *Database of the Global Environment*. National Institute of Public Health and Environment Protection, Bilthoven, Netherlands.

Tol, Richard S.J. (2006a), "The Climate Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution (FUND)", tables. pdf, version 2.8.

_____ (2006b), "The Climate Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution (FUND)", technical description, version 2.8.

_____ (2003), "Is the uncertainty about climate change too large for expected cost-benefit analysis?", *Climatic Change* 56, pp. 265–289, Kluwer Academic Publishers.

_____ (2002a), "Estimates of the Damage Costs of Climate Change, Part 1: Benchmark Estimates", *Environmental and Resource Economics* 21, pp. 47–73.

_____ (2002b), "Estimates of the Damage Costs of Climate Change, Part II: Dynamic Estimates", *Environmental and Resource Economics* 21, pp. 135-160.

_____ (2001), "Equitable Cost-Benefit Analysis of Climate Change", *Ecological Economics*, 36 (1), pp. 71-85. This paper applies FUND1.9.

Weitzman, M. (2001), *Gamma discounting*, *Am. Econ. Rev.* 91 (1), pp. 261–271.