

ARTÍCULO ORIGINAL

**Principales elementos divergentes en los modelos de evaluación integrada del impacto del cambio climático**

**Main Divergent Elements in the Integrated Assessment Models of the Impact of the Climate Change**

**Yeniley Allegue Losada**

Facultad de Economía, Universidad de La Habana, Cuba.

**RESUMEN**

El artículo analiza los principales elementos divergentes en tres de los modelos de evaluación integrada más referenciados en la literatura sobre el cambio climático: el RICE (Regional Dynamic Integrated model of Climate and the Economy), el FUND (Climate Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution) y el PAGE (Policy Analysis of the Greenhouse Effect). La investigación muestra cómo cada uno de ellos aborda temas medulares de la evaluación integrada del cambio climático desde aristas y puntos de vista diferentes, lo que conlleva a una heterogeneidad en los resultados.

Palabras clave: adaptación, discontinuidades, eventos extremos, impactos, incertidumbre.

**ABSTRACT**

The present paper analyzes the main more indexed divergent elements among three of the integrated assessment models in the literature about climate change: the RICE (Regional Dynamic Integrated model of Climate and the Economy), the FUND (Climate Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution) and the PAGE (Policy Analysis of the Greenhouse Effect). The research shows how each one of them approaches core topics of the integrated assessment of the climate change (the adaptation, the impacts, the uncertainty, the extreme events and discontinuities) from different edges and points of view, arriving to a heterogeneity in the results.

**Keywords:** adaptation, discontinuities, extreme events, impacts, uncertainty.

**Introducción**

El cambio climático se ha convertido en los últimos años en un tema de investigación y debate entre las ciencias naturales, económicas y sociales. La creciente preocupación por las consecuencias que puede ocasionar este inminente fenómeno global ha originado un notable interés por su evolución temporal y espacial desde ámbitos no solo científicos, sino también políticos y económicos.

Respondiendo a esta situación, en la actualidad es posible encontrar una diversidad de modelos de evaluación integrada del cambio climático, que muestran una gran heterogeneidad a la hora de abordar los impactos de este fenómeno. Sin embargo, tres modelos resaltan por ser los más utilizados y referenciados en la literatura actual sobre la temática: el RICE (Regional Dynamic Integrated Model of Climate and the Economy), el FUND (Climate Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution) y el PAGE (Policy Analysis of the Greenhouse Effect). Con este artículo se tiene el propósito de presentar un análisis de cada uno de los tres modelos y mostrar los principales elementos divergentes entre ellos a la hora de abordar la evaluación integrada de los impactos del cambio climático.

El análisis se expone en tres epígrafes. El primero brinda una introducción al tema de la evaluación integrada; el segundo presenta una visión general de los tres modelos considerados (RICE, FUND, PAGE), con énfasis en sus características y particularidades más relevantes. El último epígrafe muestra los principales aspectos que marcan las diferencias entre estos tres complejos modelos, dadas por la forma heterogénea con que abordan aspectos medulares de la evaluación integrada como la adaptación, los impactos del cambio climático, la incertidumbre, los eventos extremos y las discontinuidades. Finalmente, se exponen los resultados y conclusiones más significativos.

### **Evaluación integrada**

La evaluación integrada puede ser conceptualizada como «un proceso estructurado que trata con problemas complejos y utiliza conocimientos de varias disciplinas científicas, de tal manera que la comprensión integrada se hace disponible a los tomadores de decisiones» (Rotmans, 1998, p. 156).

Según el International Panel of Climate Change (IPCC) (2007), la evaluación integrada es un «proceso interdisciplinario consistente en combinar, interpretar y comunicar conocimientos de diversas disciplinas científicas de tal manera que sea posible sopesar y considerar todos los aspectos importantes de una cuestión social compleja como aporte al proceso de decisión» (p. 108).

En los últimos años, la evaluación integrada ha sido cada vez más utilizada en la investigación sobre el cambio climático global, sin descuidar los ámbitos local y regional de muchos de los impactos ocasionados por este fenómeno de carácter mundial. Al incorporar dos perspectivas diferentes «top-down» y «bottom-up», brinda la posibilidad de analizar y sintetizar, de una manera coherente, diversos y complejos problemas.

El propósito fundamental de la evaluación integrada es proporcionar una integración de conocimientos provenientes de varias disciplinas, modelos y escalas (temporal y espacial) de una manera organizada. Bajo este objetivo fundamental subyacen otros más; el hecho de que los marcos de la evaluación integrada estén caracterizados por un proceso multidisciplinario de toma de decisiones, proporciona

una mayor información que permite elegir las mejores decisiones y brinda la posibilidad de estimar los trade-offs entre diferentes opciones de políticas; con ello se puede determinar la efectividad de varias estrategias políticas.

Para el caso específico del cambio climático, la evaluación integrada debe ser capaz de responder y analizar diferentes aspectos de este fenómeno global como, por ejemplo, el ecológico, el social, el cultural y el económico. Además, cada una de estas esferas difieren en cuanto a la escala de tiempo (algunas tardan años, décadas o siglos; mientras otras ocurren en un corto tiempo), y lo mismo ocurre con la escala espacial, pues los efectos pueden ser tanto locales, como nacionales, regionales o globales; esto da fe de la complejidad del presente proceso de evaluación.

### **Modelos de evaluación integrada del impacto del cambio climático: RICE, FUND y PAGE**

El hecho de que el cambio climático sea esencialmente un fenómeno complejo por el entramado de reacciones que implica, hace de los modelos de evaluación integrada un instrumento de gran utilidad. Estos unen dimensiones socioeconómicas del cambio climático con aspectos científicos para evaluar opciones de políticas e impactos ambientales del cambio climático (Weyant et al., 1996). Los modelos combinan información sobre importantes áreas para la evaluación, al caracterizarse por integrar tres elementos clave de los impactos del cambio climático: el medio ambiente, la energía y la economía. A su vez, tienen el propósito de comprender la estrecha relación existente entre los gases de efecto invernadero, el comportamiento de los impactos y los costos de reducción de las emisiones. Sus resultados brindan a los gobiernos una síntesis coherente de los diferentes aspectos involucrados en el cambio climático pues cuantifican los problemas ambientales y no ambientales de este fenómeno global y proporcionan una mejor comprensión de sus impactos y comportamientos futuros. De igual forma, contribuyen a la evaluación de diferentes políticas, en tanto permiten determinar cuáles estrategias de adaptación son las más adecuadas en un país o región, y ello posibilita enfocar los esfuerzos a la minimización de los impactos en esa área (Allegue, 2010).

En el caso del cambio climático, se supone que los modelos de evaluación integrada en uso encuentren la mejor política basada en un largo número de magnitudes controversiales y de supuestos que les permitan: producir una valoración de los impactos físicos y daños en el capital natural y humano, y sobre la infraestructura, o estimar las pérdidas monetarias sobre el producto interno bruto (PIB); evaluar los valores monetarios de los daños y los costos de adaptación; valorar la duración de las estrategias de mitigación y de adaptación con el objetivo de comparar los beneficios presentes y futuros; estimar el bienestar humano futuro; lidiar con la incertidumbre, los umbrales medioambientales, datos exógenos al modelo y dirigir el problema de la toma de decisiones bajo complejas circunstancias (Llanes, 2009).

En la actualidad, existe una gran variedad de modelos de evaluación integrada del cambio climático que reflejan un rango importante de disciplinas científicas y la heterogeneidad de decisiones sobre política ambiental en el contexto global. En general, los modelos de evaluación integrada se diferencian entre sí en cuanto a la resolución temporal y espacial, los gases de efecto invernadero considerados, el uso de valores monetarios, las variables climáticas incorporadas, la consideración o no de la incertidumbre, eventos extremos y discontinuidades, así como el tratamiento de los impactos y la adaptación al cambio climático.

Estos modelos pueden ser divididos en dos categorías diferentes: los de optimización y los de evaluación. Los modelos de optimización de política son diseñados para determinar «la mejor» política climática definida por una función de bienestar agregada a través del tiempo, posiblemente al considerar las restricciones climáticas especificadas por los usuarios. Su complejidad es severamente limitada por los algoritmos numéricos usados para solucionar los problemas de optimización. Además, son necesarios amplios supuestos normativos para agregar todas las consecuencias de políticas alternativas en la función de bienestar social que la maximicen. Los modelos de políticas de evaluación (también conocidos como modelos de simulación), evalúan los efectos de políticas específicas sobre varios parámetros sociales, económicos y ambientales. Puesto que estos modelos no están sujetos a las restricciones computacionales de los modelos de optimización, pueden incluir un nivel mucho más alto de proceso y detalle regional, y proporcionar información más precisa sobre las consecuencias de políticas alternativas (Füssel, 2009).

Entre los modelos de evaluación integrada se destacan, por ser los más citados y utilizados en la literatura sobre evaluación de impactos del cambio climático, el RICE, el FUND y el PAGE; los dos primeros se clasifican como modelos de optimización (maximización del bienestar), mientras que el último es considerado como un modelo de evaluación (simulación).

El RICE (Regional Dynamic Integrated model of Climate and the Economy), propuesto por William Nordhaus de la Universidad de Yale, constituye una versión del DICE (Dynamic Integrated Model of Climate and the Economy), primer modelo de evaluación integrada sobre la economía del cambio climático. El RICE es un modelo de equilibrio general que permite obtener una estimación económica por regiones de los efectos del cambio climático, al involucrar e integrar múltiples elementos entre los que se destacan factores que afectan el crecimiento económico, las emisiones de CO<sub>2</sub>, el ciclo del carbón, impactos y daños climáticos. Trabaja con pasos temporales de diez años desde 1995 y hasta 2335. En él, las naciones son agrupadas en ocho regiones geográficas compuestas por países con condiciones políticas y/o económicas similares, cada una de las cuales están dotadas por un stock de capital, población y tecnología iniciales.

Las más importantes decisiones económicas a las que tienen que enfrentarse las naciones en el modelo RICE son: consumir bienes y servicios, invertir en capital productivo y retrasar el cambio climático mediante la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> (Dickinson, 2007). Este modelo es el único de los tres analizados en el presente

trabajo que integra los costos y los daños regionales, y puede ser empleado de forma directa en la evaluación de diferentes políticas para enfrentar el cambio climático sobre la base de su contribución al bienestar económico, o más bien al consumo de diferentes generaciones. Además, brinda información sobre el papel de los impuestos de carbono, elemento de gran utilidad para calibrar las diferentes políticas ambientales.

El FUND (Climate Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution), creado por Richard Tol de la Universidad de Hamburgo, consiste en un conjunto de escenarios y modelos simples de población, tecnología, economía, emisiones, química atmosférica, clima, nivel del mar e impactos. Distingue dieciséis principales regiones a nivel mundial y corre en pasos temporales de un año de 1950 a 2300.

El modelo FUND fue originalmente desarrollado con el objetivo de analizar estrategias eficientes de reducción de emisiones para varios grupos de países; no obstante, ha evolucionado rápidamente para estudiar los impactos del cambio climático en un contexto dinámico, de tal forma que en la actualidad es usado regularmente para evaluar políticas climáticas de reducción de gases de efecto invernadero mediante análisis de costo-beneficio y costo-efectividad; permite la incorporación de incertidumbre y, además, es utilizado para apoyar investigaciones que desde la teoría de juego abordan los acuerdos medioambientales internacionales. De los tres modelos analizados en este trabajo, es el más detallado y tiene como una de sus grandes fortalezas la desagregación de impactos en diferentes sectores.

El PAGE (Policy Analysis of the Greenhouse Effect), desarrollado por Chris Hope de la Universidad de Cambridge, es un modelo estocástico de evaluación integrada del cambio climático que incorpora un número importante de ecuaciones para replicar las complejas interacciones ambientales y económicas que se producen con el cambio climático; por tanto, su gran fortaleza radica en su flexibilidad para evaluar diferentes escenarios de desarrollo.

El modelo divide el mundo en ocho regiones y considera tres diferentes gases de efecto invernadero: dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ) y hexafluoruro de azufre ( $\text{SF}_6$ ). Incluye diez intervalos de tiempo variables, espaciados a lo largo de doscientos años, desde 2000 hasta 2200. Calcula los costos de adaptación y mitigación, y considera impactos tanto económicos como no económicos.

Es necesario señalar que estos modelos de evaluación integrada no proveen una respuesta definitiva a todas las interrogantes del cambio climático, dada la inherente incertidumbre que caracteriza este fenómeno global. Sin embargo, proveen una descripción del estado del arte de los impactos y brindan respuestas internamente consistentes, lo que muestra la utilidad y fortaleza de estos modelos en aras de desarrollar acciones frente al cambio climático global.

## **Principales elementos divergentes entre los modelos de evaluación integrada de los impactos del cambio climático**

Existen notables diferencias entre los principales modelos de evaluación integrada abordados en el presente trabajo. Cada uno de ellos asume de una manera distinta elementos medulares de la evaluación integrada del cambio climático como el tratamiento a la adaptación y los impactos, la consideración de la incertidumbre y la inclusión o no de los eventos extremos y discontinuidades.

### **La adaptación al cambio climático**

El IPCC (2007) define la adaptación como el «ajuste de los sistemas naturales o humanos en respuesta a estímulos climáticos reales o esperados, o a sus efectos, que atenúa los efectos perjudiciales o explota las oportunidades beneficiosas. Cabe distinguir varios tipos de adaptación, en particular, la anticipatoria, la autónoma y la planificada» (p. 103).

La adaptación puede ser entendida, en un sentido más amplio, como cualquier acción dirigida a reducir los impactos o aprovechar los llamados impactos beneficiosos del cambio climático. Si se realiza una comparación con el hipotético «escenario de no adaptación» (utilizado frecuentemente en la literatura), resulta muy fácil concluir que mediante la adaptación pueden disminuir muchos de los impactos adversos tanto sociales como económicos del cambio climático, aunque es igualmente comprensible que durante este proceso se incurra en determinados costos. No obstante, es preciso destacar que las potencialidades de adaptación del ser humano para prevenir o reducir los cambios biofísicos resultan en su gran mayoría mucho más limitados, sin subestimar el hecho de que los límites entre los impactos humanos y la adaptación no son tan fáciles de determinar en todos los casos.

Usualmente, la adaptación es ignorada o tratada implícitamente como parte de los daños estimados en los modelos de evaluación integrada; el argumento principal de este hecho radica en que los modelos se caracterizan por hacer énfasis en los trade-offs existentes entre los daños del cambio climático y los costos de mitigación, y obvian, en buena medida, la adaptación.

Füssel (2009) plantea que la adaptación es más difícil de incorporar en los modelos de evaluación integrada que en la mitigación por múltiples razones:

La incertidumbre juega un papel mucho más importante en la adaptación debido a su sensibilidad a la distribución espacial y temporal de los impactos del cambio climático.

La adaptación involucra un rango de actores y acciones más diverso, lo cual complica su representación en los modelos agregados.

La adaptación es más difícil de separar de las actividades corrientes, y no existe ningún indicador común de comportamiento. Ambos factores dificultan la determinación de sus costos y efectividad.

La adaptación está a menudo restringida por los factores no económicos, incluso por las preferencias culturales y el uso no óptimo de información por los agentes, lo que complica una modelación probable u óptima de ella.

Los beneficios de la mitigación son universales y sus costos pueden compartirse globalmente a través del comercio de las emisiones. Sin embargo, los beneficios y costos de la adaptación ocurren principalmente a nivel local o regional, lo que limita severamente la utilidad del análisis global agregado.

A los factores anteriores, es posible adicionar otros dos elementos que los refuerzan: la existencia de una incorrecta interpretación o falta de información sobre la adaptación; así como la presencia de dificultades en la medición y cuantificación de este proceso, que implica, en muchos casos, su inadecuada o no inclusión en los modelos.

Es indudable la importancia de incorporar la adaptación en los diferentes modelos de evaluación de los impactos del cambio climático, dado su incuestionable implicación en este fenómeno global. Según Berkhout (2005), la adaptación es esencial en la reducción de los actuales e inevitables impactos del cambio climático. Sus beneficios netos son experimentados inmediatamente.

La consideración de la adaptación por los modelos de evaluación integrada puede ser clasificada en dos vertientes: una correspondiente a los modelos con funciones de daños monetarias y, la otra, con funciones no monetarias. Aunque los modelos analizados en este trabajo se caracterizan por desarrollar funciones de daños monetarias, cada uno de ellos considera la adaptación de manera diferente.

El RICE, por ejemplo, aborda la economía del cambio climático desde la perspectiva de la teoría del crecimiento económico. Aun cuando en el modelo se asume que existe una adaptación —en particular para la agricultura—, esta no es modelada explícitamente sino es considerada a través de una función de daño. Los daños son estimados sobre la base de una función de producción bajo los marcos de un equilibrio general, donde se asume que las pérdidas son minimizadas a través de cambios en la producción. En este sentido, las funciones de daño del modelo consideran implícitamente una adaptación óptima si se tiende a ignorar los costos de adaptación.

En el caso de las aplicaciones del FUND, estas desarrollan funciones de daño que minimizan las pérdidas a través de la adaptación, siempre y cuando sea posible. En este tipo de modelo es necesario hacer resaltar dos aspectos esenciales que brindan elementos sobre el tratamiento de la adaptación: en primer lugar, la forma reducida de la función de daño para la agricultura representa explícitamente la adaptación mediante la transformación en el tiempo y de los costos, lo cual es posible al ser considerado no solo el nivel, sino también la velocidad con que ocurre el cambio

climático global; en segundo lugar, el modelo asume explícitamente la adaptación con el incremento del nivel del mar, mediante una función de daño que considera la protección costera como una variable de decisión continua, la cual es optimizada a través de un análisis costo-beneficio. No obstante, este supuesto de una adaptación óptima con el incremento del nivel del mar no ha sido tratado rigurosamente en el análisis para evaluar el trade-off entre la adaptación y la mitigación en este sector, específicamente.

El PAGE, por su parte, modela estrategias de adaptación para mostrar los beneficios de adaptación al cambio climático (Dickinson, 2007). En el modelo los costos de adaptación son estimados para cada región considerada por él (PAGE). Aquí la adaptación es incluida como una variable de decisión (Alberth y Hope, 2007) y es representada como un escenario definido por dos tipos de opciones: la no adaptación o una adaptación agresiva. En este último caso se consideran las inversiones en medidas de adaptación que puedan incrementar el nivel tolerable de cambios de temperatura antes de que ocurran las pérdidas económicas, y además, que reduzcan la intensidad de los impactos tanto económicos como no económicos. En resumen, el resultado del modelo demuestra que la adaptación es muy efectiva en la reducción de los impactos globales del cambio climático. Algunos estudios recientes señalan, sin embargo, que estos supuestos sobre la efectividad de la adaptación en los cuales se basa el modelo han sido muy optimistas, y han dado lugar a versiones recientes del PAGE que incorporan supuestos menos optimistas.

En general, la incorporación de la adaptación en los modelos analizados puede ser clasificada como moderada y amerita, en su totalidad, un mayor estudio. Todos coinciden en tratar la adaptación al cambio climático como una actividad adicional, separada de las actividades humanas corrientes, idea que usualmente es fuente de crítica a estos modelos, bajo el argumento de que algunas de las acciones y el comportamiento humanos pueden ser un componente esencial y contribuir exitosamente a la adaptación al cambio climático.

### **Los impactos del cambio climático**

Al igual que en el caso de la adaptación, la consideración de los impactos del cambio climático en los modelos de evaluación integrada analizados es fuente de una heterogeneidad de principios y supuestos que marcan las diferencias entre ellos, a pesar de que los tres coinciden en incluir las inestabilidades climáticas a gran escala en funciones de daño.

Frecuentemente, los modelos del tipo de políticas de optimización requieren una función de daño para incorporar los impactos del cambio climático en la función de bienestar social (este es el caso del RICE y el FUND), aun cuando existen notables diferencias en las funciones de daño de ambos modelos.

En el modelo RICE, los daños climáticos son representados como un polinomio de segundo orden que toma en cuenta solamente los cambios (incremento) de la



temperatura media global. El modelo evalúa varios tipos de impactos sobre una base sectorial: los impactos tangibles para sectores de mercado como la agricultura, la elevación del nivel del mar (costos de tormentas, tierras inundadas y reubicación de asentamientos humanos), la silvicultura, el consumo de energía y agua, la construcción, la pesca; los impactos intangibles para sectores de no-mercado como la recreación al aire libre, las zonas costeras, la mortalidad por enfermedades relacionadas con el clima y la polución, y los ecosistemas; y los impactos por eventos climáticos extremos. La estimación de los impactos es realizada a nivel de costos de manera global, es decir, no se desagregan por sectores en los resultados. En general, los impactos del cambio climático para todos los sectores seleccionados son representados en una función de daño –se asume una adaptación óptima– y descontados de manera agregada como fracción del PIB.

En el FUND, los impactos económicos son modelados como pérdidas que reducen el ingreso disponible. Los escenarios son solo perturbados ligeramente por los impactos del cambio climático; sin embargo, el ingreso y la población son principalmente exógenos (Tol et al., 2003).

El módulo de impactos tiene dos unidades de medida: personas y dinero. Las personas pueden morir prematuramente (por stress de calor, malaria, ciclones tropicales) o emigrar. Estos efectos, como todos los impactos, se monetizan. El daño puede ser considerado según la tasa de cambio o el nivel de cambio (Tol, 1999).

En este modelo (el FUND), los impactos climáticos vienen dados por el nivel y la tasa de cambio de la temperatura media global, cambios en el nivel del mar, tormentas e inundaciones de los ríos (se asume que las últimas tres variables climáticas cambian linealmente con la temperatura media global) y la concentración de CO<sub>2</sub> (Füssel, 2009).

El daño es calculado a través de un polinomio de segundo-orden en cambio climático y se encuentra determinado por impactos tangibles referidos a aquellos que se producen en sectores de mercado: agricultura, silvicultura, consumo de energía en refrigeración, climatización y calefacción, recursos hídricos, protección de las costas y pérdidas de tierras secas inundadas; e impactos intangibles, por ejemplo, los que ocurren en sectores de no mercado: zonas costeras y ecosistemas, pérdidas de terrenos pantanosos, migración por inundaciones, así como la mortalidad y la morbilidad por enfermedades inducidas por vectores, diarrea y cambios de temperatura. Es característica del FUND la estimación de funciones de daños, separadas para cada uno de los sectores considerados.

Los daños tangibles repercuten en la inversión y el consumo; a través de la inversión, es afectado el crecimiento económico; y a través del consumo, el bienestar. Los daños intangibles afectan el bienestar. La vulnerabilidad relativa al cambio climático varía con el desarrollo económico de muchas maneras. La importancia de la agricultura disminuye con el crecimiento per cápita del ingreso y, de igual manera, la incidencia de la malaria y la inclinación a emigrar. El stress del calor

umenta con la urbanización, y la valoración de los impactos sobre los bienes y servicios de no mercado crece con el ingreso per cápita (Tol et al., 2003).

«De forma general los diferentes impactos en FUND, son en 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 » (Turtós, 2008, p. 58).

Donde:

t: año.

r: región.

$\Delta T_{t,r}$ : cambio de la temperatura regional en el año t.

$Y_{t,r}$ : ingreso per cápita regional en el año t.

$Y_{0,r}$ : ingreso per cápita regional en el año base.

Los costes regionales relativos se ajustan al promedio global. Esto, particularmente, influye en las regiones en vías de desarrollo para las cuales está disponible mucha menos información sobre los costos de reducción de emisiones, los cuales son representados por una función cuadrática, y a pesar de que son calculados y considerados en los resultados del modelo, no aparecen directamente en los ficheros de salida. En este sentido, cabe destacar que el FUND ha sido aplicado para comparar los efectos de los diferentes impactos regionales sobre los daños totales del cambio climático (Füssel, 2009).

A diferencia del RICE y el FUND, que son modelos de optimización, el PAGE es un modelo de política de evaluación; a pesar de ello, utiliza, al igual que el resto, funciones de daños monetarias. En el PAGE, el impacto del cambio climático en cada año de análisis es modelado como una función polinómica del incremento regional de la temperatura de ese año sobre un nivel tolerable de cambio de temperatura tiempo-variante  $(T - T_{\text{tolerable}})^n$ , donde n es un parámetro de entrada indeterminado. Los impactos son agregados, para ello se usan tasas de descuento variables en el tiempo (Hope y Alberth, 2007), y son evaluados como porcentaje de pérdidas del PIB anual en cada región. Se definen como impactos tangibles (impactos económicos sobre sectores que son directamente incluidos en el PIB) e impactos intangibles (impactos ambientales y sociales que no son directamente incluidos en el PIB). La estimación de impactos, tanto para los tangibles como para los intangibles, es realizada a nivel de costos de manera global y sin diferenciar sectores.

Es necesario señalar también que el modelo PAGE «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» (Turtós, 2008, p. 2).

En el PAGE, los costos están directamente asociados a las propias reducciones de emisiones. El cálculo comienza con la asignación a cada región de una senda de emisión, tal y como queda descrito en el escenario que es modelado y que es

comparado con el (escenario) BAU (business as usual). Las reducciones realizadas por cada región son la diferencia entre estas dos sendas de emisión. El modelo usa un set de costos unitarios fijos asociados con la reducción para calcular los costos totales de reducción, los costos de adaptación y los impactos causados por el cambio climático, inducidos por el nivel de emisiones del escenario (Alberth y Hope, 2007).

Finalmente, los costos totales de un escenario de reducción comparado con el BAU pueden ser confrontados con la reducción total de impactos (impactos ganados). La diferencia de estos dos valores representa el valor presente neto (NPV) de la estrategia de adaptación, en la medida en que un valor positivo NPV significa que los beneficios descontados pesan más que los costos descontados (Hope, 2006).

### **La incertidumbre**

La incertidumbre es uno de los aspectos en donde se observa una mayor heterogeneidad entre los modelos. En el caso del RICE, no se realiza un análisis riguroso de este aspecto; no obstante, se señalan las variables con mayor incertidumbre. El ejemplo más singular en este sentido resulta ser la variable «proyección futura de la productividad total de los factores». El resto de los modelos (FUND y PAGE) han sido aplicados para evaluaciones probabilísticas que utilizan el análisis Monte Carlo. Füssel (2009) plantea que el tratamiento más completo de la incertidumbre es a través de este análisis, donde las distribuciones de probabilidad son especificadas para varios parámetros, y las entradas y los resultados son determinados como una distribución de probabilidad.

En el FUND, el tratamiento de la incertidumbre es realizado mediante la aplicación del método de Monte Carlo (Tol et al., 2003) y, precisamente, una de las fortalezas del modelo resulta ser la consideración de las incertidumbres del cambio climático en las funciones de daño monetarias y utilizadas.

De igual manera, la característica estocástica del PAGE es diseñada para captar la incertidumbre que permanece debido a la naturaleza aleatoria del cambio climático; los rangos de datos se obtienen utilizando la técnica de muestreo Latin Hypercube; que genera a través del @Risk y Risk Optimiser aplicaciones instaladas encima de una plataforma Excel existente (Palisade). Estos programas diseñados, específicamente para la modelación estocástica, permiten al usuario definir el tipo de distribución a usar para todas las entradas del modelo. Este simula los resultados; para ello ejecuta un número fijo de iteraciones y presenta resúmenes estadísticos de los coeficientes de correlación entre las entradas del modelo y sus diferentes salidas (Alberth y Hope, 2007).

La técnica de muestreo Latin Hypercube del método de Monte Carlo permite seleccionar entre los parámetros con incertidumbre, un juego de datos para cada una de las corridas, y genera una distribución de probabilidad de los resultados del modelo; con ello se llega a precisiones de una forma más eficiente.

El modelo PAGE cuenta con alrededor de ochenta 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 (Turtós, 2008, p. 26).

Al emplear distribuciones de probabilidad para variables económicas y ambientales de entrada en vez del valor medio esperado, el modelo calcula un rango y no el supuesto mejor resultado (un valor puntual) para salidas como las temperaturas, los impactos y los costos. Lo anterior, unido a la iteración de miles de diferentes posibles resultados, permite al modelo evitar un error que es muy común: asumir linealidad entre las entradas y las salidas cuando en realidad el modelo no es lineal. Como resultado, el PAGE puede esclarecer parte de la incertidumbre asociada al cambio climático. El análisis de sensibilidad puede también ser utilizado para determinar qué rangos de entrada tiene el efecto más importante sobre los principales resultados del modelo.

### **Los eventos extremos y discontinuidades**

En cuanto a la incorporación de eventos extremos y discontinuidades, solo es posible considerar los modelos PAGE y RICE, los cuales incluyen posibles eventos extremos a gran escala como consecuencia del incremento de la temperatura por encima de valores donde la adaptación ya no es posible, y es de esperar que tendrán un peso importante en los costos del cambio climático para elevados niveles de calentamiento.

El RICE calcula los impactos por incremento de los eventos extremos (catástrofes) o discontinuidades futuras a gran escala cuando se producen incrementos de temperatura de hasta 3 °C y por encima de este límite, valores de temperatura donde no es posible una adaptación.

El modelo PAGE también considera la posibilidad de discontinuidades o sucesos singulares futuros a gran escala, mediante una probabilidad de discontinuidad linealmente creciente que reduce sustancialmente el PIB cuando se producen incrementos de la media global de temperatura por encima de un nivel tolerable. De esta forma, el modelo es capaz de evaluar los impactos resultantes de eventos climáticos extremos. En el caso del FUND, la inclusión de los eventos extremos y las discontinuidades se encuentra aún en desarrollo.

### **Consideraciones finales**

Los principales elementos abordados, que marcan las diferencias fundamentales entre los tres modelos analizados, son mostrados a manera de resumen en la tabla 1.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ackerman, F.; E. A. Stanton, C. Hope y S. Alberth (2009): «Did the Stern Review Underestimate U.S. and Global Climate Damages?», *Energy Policy*, vol. 37, pp. 2717-2721.
- Alberth, S. y C. Hope (2007): «Climate Modeling with Endogenous Technical Change: Stochastic Learning and Optimal Greenhouse Gas Abatement in the PAGE 2002 Model», *Energy Policy*, vol. 35, pp. 1795-1807.
- Allegue, Y. (2010): «Modelos de evaluación integrada del impacto del cambio climático. Algunas consideraciones sobre un modelo para la región del Caribe», *Economía y Desarrollo*, vol. 145, n.º 1-2, pp. 237-264.
- Anthoff, D.; S. Rose, R. Tol y S. Waldhoff (2011a): «Regional and Sectoral Estimates of the Social Cost of Carbon: An Application of FUND», *ESRI Working Paper*, n.º 375, pp. 237-264.
- Anthoff, D.; S. Rose, R. Tol y S. Waldhoff (2011b): «The Time Evolution of the Social Cost of Carbon: An Application of FUND», *ESRI Working Paper*, n.º 405, pp. 148-167.
- Anthoff, D. y R. Tol (2011): «The Uncertainty about the Social Cost of Carbon: A Decomposition Analysis Using FUND», *ESRI Working Paper*, n.º 404, pp. 54-77.
- Berkhout, F. (2005): «Rationales for Adaptation in EU Climate Change Policies», *Climate Policy*, Special Issue: Climate Policy Options Post-2012: European Strategy, Technology and Adaptation after Kyoto, n.º 5, pp. 377-391, <[http://www.hm-treasury.gov.uk/media/8AA/9C/stern\\_review\\_supporting\\_technical\\_material\\_frans\\_berkhout\\_2310006.pdf](http://www.hm-treasury.gov.uk/media/8AA/9C/stern_review_supporting_technical_material_frans_berkhout_2310006.pdf)> [2011-10-20].
- Dickinson, T. (2007): *The Compendium of Adaptation Models for Climate Change: First Edition*, Adaptation and Impacts Research Division, Environment Canada, Toronto.
- Döll, S. (2009): «Climate Change Impacts in Computable General Equilibrium Models: An Overview», *HWWI Research Papers*, n.º 39, Hamburg Institute of International Economics (HWWI), pp. 1-26.
- Fankhauser, S. (1994): «Protection vs. Retreat: The Economic Costs of Sea Level Rise», *Environment and Planning A*, n.º 27, pp. 299-319.
- Füssel, H. M. (2009): «Modelling Impacts and Adaptation in IAMs», *Climate Change*, (bajo revisión).

- Hope, C. (2006): «The Marginal Impact of CO<sub>2</sub> from PAGE2002: an Integrated Assessment Model Incorporating the IPCC's Five Reasons for Concern», *The Integrated Assessment Journal*, vol. 6, pp. 19-56.
- Hope, C. (2011): «The PAGE2009 Integrated Assessment Model: a Technical Description», inédito, Judge Business School, University of Cambridge, UK.
- Hope, C. y S. Alberth (2007): *US Climate Change Impacts from the PAGE2002 Integrated Assessment Model Used in the Stern Report*, Judge Business School, University of Cambridge, UK.
- International Panel of Climate Change (IPCC) (2007): *Cambio climático 2007: impacto, adaptación y vulnerabilidad (contribución del grupo de trabajo II al IV Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático)*, Organización Meteorológica Mundial (OMM) y Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA).
- Llanes, J. (2009): «Review of the Economics of Climate Change, an Assessment for the Caribbean Region», *Expert Meeting on Review of the Economics of Climate Change in the Caribbean*, ECLAC (CEPAL), Trinidad y Tobago, junio.
- Nordhaus, W. D. (2006): «RICE and DICE Models of Economics of Climate Change: Spreadsheet Versions of DICE-99 and RICE-99 Models», Yale University, New Haven, <<http://www.econ.yale.edu/~nordhaus/homepage/dice.html>> [2011-10-20].
- Nordhaus, W. D. (2007a): «Accompanying Notes and Documentation on Development of DICE-2007 Model (Notes on DICE-2007.delta.v8)», inédito, Yale University, New Haven.
- Nordhaus, W. D. (2007b): *The Challenge of Global Warming: Economic Models and Environmental Policy*, <<http://www.econ.yale.edu/~nordhaus/homepage/DICE2007.html>> [2011-10-20].
- Nordhaus, W. D. (2008): *A Question of Balance: Economic Modeling of Global Warming*, Yale University Press, New Haven.
- Nordhaus, W. D. (2009): «Alternative Policies and Sea-Level Rise in the RICE-2009 Model», *Cowles Foundation Discussion Paper*, n.º 1716, pp. 131-149.
- Parson, E. A. (1995): «Integrated Assessment and Environmental Policy Making in Pursuit of Usefulness», *Energy Policy*, n.º 23, pp. 463-475.
- Rotmans, J. (1998): «Methods for IA: the Challenges and Opportunities Ahead», *Environmental Modeling and Assessment*, n.º 3, pp. 155-179.
- Tol, R. (1999): «Safe Policies in an Uncertain Climate: an Application of FUND», *Global Environmental Change*, n.º 9, pp. 221-232.

Tol, R. (2007): «The Double Trade-off between Adaptation and Mitigation for Sea Level Rise: An Application of FUND», Mitigation and Adaption Strategies for Global Change, vol. 12, n.º 5, pp. 741-753.

Tol, R.; R. Heintz y P. Lammers (2003): «Methane Emission Reduction: an Application of FUND», Climatic Change, n.º 57, Kluwer Academic Publishers, pp. 71-98.

Turtós, L. (2008): Una introducción a los modelos integrados de valoración del cambio climático, Naciones Unidas y Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), Santiago de Chile.

Waldhoff, S.; D. Anthoff, S. Rose y R. Tol (2011): «The Marginal Damage Costs of Different Greenhouse Gases: an Application of FUND», ESRI Working Paper, n.º 380, pp. 67-84 .

Weyant, J. et al. (1996): «Integrated Assessment of Climate Change: an Overview and Comparison of Approaches and Results», Climate Change 1995: Economic and Social Dimensions of Climate Change, Cambridge University Press, pp. 47-79.

RECIBIDO: 2/11/2011

ACEPTADO: 17/3/2014

Yeniley Allegue Losada. Facultad de Economía, Universidad de La Habana, Cuba.  
Correo electrónico: [yeall@fec.uh.cu](mailto:yeall@fec.uh.cu)

## **NOTAS ACLARATORIAS**

Para una mejor comprensión de estos modelos puede consultarse Allegue (2010).