

MODELOS Y COSTOS DE LA MITIGACIÓN DE EMISIONES

El caso de un mercado de permisos de emisión para España*

*Mikel González-Eguino***

RESUMEN

El estudio de los efectos de la mitigación del cambio climático requiere el uso de metodologías diversas. Este artículo analiza y clasifica los modelos más utilizados en la bibliografía, así como sus diferentes aplicaciones. A continuación, se presenta un modelo de equilibrio general aplicado (MEGA) dinámico que incorpora un mercado de permisos de emisión. Este instrumento es una realidad en la Unión Europea desde la aplicación en 2005 del Sistema Europeo de Permisos de Emisiones Transferibles (EU ETS). Mediante dicho modelo es posible estimar reducciones costo-efectivas de las emisiones de gases de efecto invernadero. El modelo presentado se aplica al caso de la reducción de emisiones en España.

ABSTRACT

The study of economic impacts of climate change mitigation policies requires the use of different methodologies. This article discusses the most used models in literature as well as its applications. We presents dynamic Applied General Equilibrium

* *Palabras clave:* políticas públicas, modelos de equilibrio general dinámico, cambio climático.
Clasificación JEL: H20, D58, Q20. Artículo recibido el 21 de agosto de 2008 y aceptado el 27 de abril de 2009.

** Basque Centre for Climate Change (BC3), Bilbao (correo electrónico: mikel.gonzalez@bc3research.org).

model (AGE) that implement a market for emissions permits. Emission markets are reality in European Union since the introduction in 2005 of the European Union Emissions Trading System (EU ETS). Through this model it is possible to estimate the minimum cost of controlling greenhouse emissions. The model is used to analyse emission reductions for the case of Spain.

INTRODUCCIÓN

En los años recientes se han estudiado extensamente las relaciones entre la acción del hombre, la acumulación de gases de efecto invernadero (GEI) y el cambio climático (CC). Uno de los debates de mayor actualidad se centra en alcanzar un acuerdo para reducir GEI global y repartir las cuotas entre países. Una decisión racional al respecto requiere conocer los costos y los beneficios de dichas políticas.

El informe de 2007 del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) recoge un estudio exhaustivo de los distintos efectos esperados según distintos modelos. Según el IPCC existe potencial suficiente para reducir las emisiones, pero el costo medio de dicha reducción oscila entorno de los 20-50 dólares por tonelada (US\$/tCO₂-eq). La mayoría de estudios señalan que un aumento de los precios mundiales del CO₂ hasta los USD\$ 20-80/tCO₂ de aquí a 2030 sería coherente con una estabilización de las concentraciones entorno de las 550 ppm en 2100, pero para alcanzar el objetivo de las 450 ppm —que permitiría estabilizar el aumento de temperatura entorno de los 2°C— sería necesario un precio superior a los 100 dólares. Todos los estudios muestran que no existe una tecnología que pueda proporcionar todo el potencial de mitigación en ninguno de los sectores. Por otro lado, y según el informe Stern (Stern, 2006), el costo del CC, es decir, el costo de no hacer nada, sería mucho mayor y se situaría entorno del 5 y 20% del PIB mundial.

Este artículo hace un repaso de la evolución de los modelos más utilizados en este tipo de análisis y presenta un modelo de equilibrio general aplicado (MEGA) dinámico que capta las principales relaciones económicas, energéticas y ambientales y que permite avanzar en el análisis de los costos de mitigación nacional y regional. Este modelo permite investigar los efectos de políticas que se extienden en el largo plazo y que afectan de una manera general el sistema económico. Una característica específica del modelo es que incluye todas las emisiones de GEI sujetas a control por el Protocolo de Kioto (ONU, 1997).

Para controlar la contaminación disponemos de diversos tipos de instrumentos. Los economistas (Hahn, 2000) han defendido en los decenios recientes la utilización de instrumentos de mercado, como impuestos o permisos transferibles, junto a instrumentos de regulación, como el establecimiento de normas o de estándares tecnológicos. Países como Suecia, Noruega o Alemania ya han introducido programas de reformas fiscal ambiental (OCDE, 1999) y otros muchos han comenzado a introducir impuestos ambientales. Desde 2005 funciona el Sistema Europeo de Permisos de Emisiones Transferibles (EU ETS), un mercado que abarca el 50% de las emisiones europeas.

El artículo se ordena de la siguiente manera: la sección I realiza un repaso de los modelos más utilizados. La sección II describe extensamente el modelo propuesto y la sección III analiza su aplicación al caso de España. Al final se recoge las limitaciones de este tipo de análisis y las principales conclusiones.

I. TIPOS DE MODELOS

La bibliografía muestra diferentes maneras de analizar los efectos económicos de la política contra el CC. Los objetivos específicos de cada investigación decidirán en gran medida las características del modelo por utilizar, ya que no existe un modelo que pueda tratar todos los aspectos en detalle. Podemos clasificar estos modelos en seis categorías que pormenorizaremos a continuación.

1. Modelos energéticos

Los modelos energéticos fueron los precursores en el análisis de los efectos económicos de las políticas energéticas y medioambientales. En un inicio eran modelos de optimización o programación lineal, con un alto detalle tecnológico, que posteriormente fueron incluyendo funciones no lineales para representar la posibilidad de sustitución entre factores. En la actualidad estos modelos son de equilibrio parcial que centran su esfuerzo en una caracterización profunda de los sectores energéticos y eléctricos, como es el caso del modelo MARKAL (Seebregts *et al.*, 2001) o el modelo POLES (Criqui *et al.*, 2001).

Estos modelos, conocidos como modelos ascendentes (*bottom-up*), tienen dos inconvenientes principales; suelen considerar la demanda energética de manera exógena e independiente de los precios y además suelen obviar las relaciones del sector energético con el resto de la economía.

2. Modelos de equilibrio general aplicado

Los MEGA se basan en la teoría neoclásica del comportamiento de los agentes y el funcionamiento de los mercados. Estos modelos, conocidos como modelos descendentes (*top-down*) permiten considerar la economía en su conjunto. Algunos ejemplos notorios de aplicación de MEGA son a nivel global y para los Estados Unidos Babiker *et al* (2001), para Europa Capros *et al* (1998) y, para la América Latina Boyd e Ibarra (2002) o Persson y Munasinghe (1995). Estos modelos tienen una sólida base microeconómica y permiten captar las múltiples interrelaciones económicas y, por ello, son utilizados para analizar políticas con efectos directos e indirectos significativos, como es el caso de políticas comerciales, fiscales o ambientales.

Los modelos insumo-producto (*input-output*) también podrían situarse, aunque con ciertas matizaciones, dentro de esta categoría, ya que se basan en el supuesto de equilibrio y consideran la economía en su conjunto. La principal diferencia estriba en su carácter lineal y en la utilización de estructuras de producción y utilidad tipo Leontief. La hipótesis de sustituibilidad nula convierte a estos modelos en instrumentos transparentes y sencillos para analizar los efectos de las políticas en el corto plazo.

Los MEGA presentan, sin embargo, algunas desventajas. Una de las principales es el supuesto de equilibrio y mercados perfectamente competitivos. Aunque es bien conocida la existencia de fallas de mercado (Blanchard y Fischer, 1989), también es cierto que existen posibilidades para introducirlas y modelarlas en un MEGA aunque ello supone en general una mayor complicación del análisis. Por otra parte, estos modelos también suelen asumir factores perfectamente móviles entre sectores y costos de transacción nulos.

3. Modelos macroeconómicos neokeynesianos

Los modelos macroeconómicos neokeynesianos son una variedad de los modelos de equilibrio general. La diferencia principal estriba en que su base no es la teoría microeconómica neoclásica, sino las tendencias históricas y las series de datos. El componente principal de estos modelos es la demanda que por lo general suele ser bastante agregada. Otra de sus características es que no suponen forzosamente un equilibrio en los mercados. Algunos ejemplos notorios son el modelo G-CUBED (McKibbin *et al*, 1999) y el modelo Oxford (Cooper *et al*, 2005).

Estos modelos tienen un importante componente econométrico en el establecimiento de correlaciones. Su mejor ajuste a la realidad los hace útiles para las estimaciones en el corto plazo, mientras que en el largo plazo los modelos de equilibrio general suelen ser más utilizados. En general, el uso de este tipo de modelos es muy escaso en la bibliografía.

4. Modelos de análisis integrado

Los modelos de análisis integrado se caracterizan por unificar los fenómenos económicos y climáticos. Por un lado, consideran los efectos de la actividad económica en el clima (efectos hacia delante) y, por otro, los efectos del CC en la actividad económica (efectos hacia atrás).

Una de las ventajas de este tipo de modelos es que permiten integrar los costos y los beneficios de las políticas de reducción de las emisiones y esto hace posible obtener sendas óptimas de reducción de emisiones. Uno de los trabajos precursores en este tipo de análisis es el modelo DICE (Nordhaus, 1993) y RICE (Nordhaus y Yang, 1996). Su principal dificultad reside en la complejidad de los sistemas climáticos y en la dificultad que supone valorar monetariamente muchos de los daños ambientales.

5. Modelos de comercio de emisiones

Algunos modelos recientes utilizan las curvas de costo marginal de reducción de emisiones (CMR), procedentes de los MEGA, para investigar aspectos estratégicos relacionados con los mercados de permisos de emisión, fundamentalmente aplicados al EU ETS. Algunos de los trabajos más recientes en esta línea de investigación son Ellerman y Deceaux (1998), Holtsmark y Maestad (2002) o Michaelowa y Jotzo (2005). Una de las principales ventajas de este tipo de modelos es que permiten analizar los aspectos estratégicos del nuevo mercado del CO₂ europeo. Además, las CMR utilizadas incorporan los costos directos y los indirectos.

6. Modelos espaciales-ambientales

En este apartado confluyen toda la amplia gama de modelos de corte económico-ambiental que han incorporado en su seno la variable espacial, y que surgen de la economía espacial y de la nueva geografía económica (Fujita,

Krugman y Venables, 1999). Esta variable fue de particular importancia en la elaboración de los mercados de permisos de emisión, por ejemplo en el caso del CO₂ en el sector eléctrico en los Estados Unidos. No considerar la variable espacial para “zonificar” el mercado podría hacer que la política aumentará el daño si lo permisos y, por tanto, las emisiones se concentrarán en las industrias más cercanas a los núcleos de población.

Por último, es necesario señalar que esta clasificación podría extenderse y combinarse de manera muy variada. Por ejemplo, en los años recientes se han desarrollado los llamados modelos “híbridos”, que son una combinación de los modelos ascendentes y descendentes. Bohringer (1998) realiza una síntesis teórica de estas dos tipologías para un número finito de sectores y Dellink *et al.* (2004) presentan un método práctico para integrar información ascendente en un MEGA. La mayoría de los MEGA avanzan en esta dirección, ya que las funciones de producción son cada vez más ricas en su desagregación tecnológica.

II. UN MEGA DINÁMICO TIPO RAMSEY

Esta sección presenta un modelo dinámico de equilibrio general aplicado. Un MEGA es una versión empírica de un modelo walrasiano que recogen las interdependencias entre los diversos agentes económicos. Este tipo de modelos permiten advertir el flujo circular de la renta y son muy útiles para analizar las políticas con efectos generales en la economía. En el caso de las políticas de mitigación de emisiones de GEI esto es fundamental ya que todas las actividades económicas directa o indirectamente (por medio del consumo de electricidad) consumen combustibles fósiles y, por tanto, emiten CO₂ a la atmósfera. Una introducción se encuentra en Shoven y Whalley (1992) o Ginsburgh y Keyzer (1997).

Los MEGA pueden ser estáticos (GEM-E3, Capros *et al.*, 1998), recursivos (MIT-EPPA, Babiker *et al.*, 2001) o dinámicos. La simulación de políticas que se extienden en el largo plazo requiere para una mejor comprensión el uso de modelos dinámicos. Por ello, se utiliza un MEGA dinámico tipo Ramsey (Barro y Sala-i-Marti, 1995), en el que los agentes deciden entre consumir o ahorrar en cada periodo con el objetivo de maximizar la utilidad en todo el periodo de análisis.

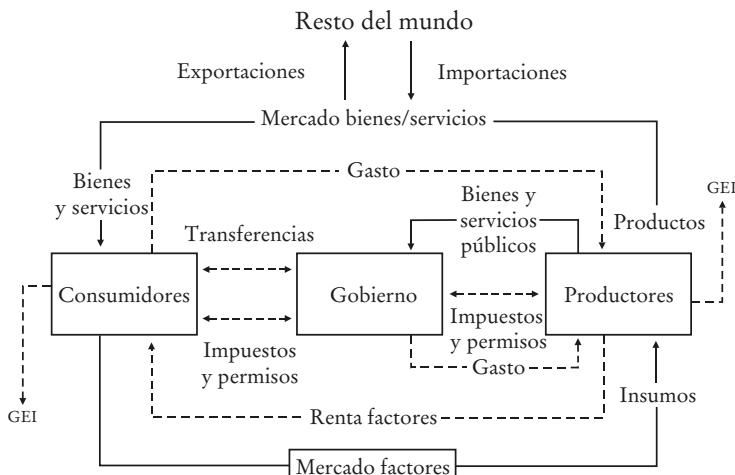
La política ambiental se instrumenta simulando un mercado de permisos de emisión transferibles. El gobierno fija para cada periodo el número de

permisos y deja que se intercambien libremente en el mercado. Desde un punto de vista teórico, en un mercado perfectamente competitivo, esta aproximación tiene la ventaja de ser eficaz y costo-efectiva; se alcanzan los objetivos al costo mínimo. Los permisos pueden ser tratados como un factor productivo más que alcanza un precio de equilibrio por medio de la oferta y la demanda (Dellink, 2005). A medida que el gobierno reduce el número de permisos, genera escasez y su precio aumenta. La simulación aquí realizada no tiene consecuencias prácticas respecto a la selección de instrumentos; para ello sería necesario considerar otros criterios diferentes de la eficiencia y otros aspectos como los costos de transacción y supervisión.

El modelo se compone de: *i)* 22 sectores productivos, *ii)* un consumidor representativo, *iii)* un gobierno, que recauda impuestos, proporciona bienes y servicios públicos y controla las emisiones de GEI por medio de los permisos de emisión y, por último, *iv)* el agregado resto del mundo, que agrupa a todo el sector exterior. La desagregación de los sectores productivos comprende a los sectores energéticos (carbón, petróleo, gas natural y electricidad), a los sectores relevantes por sus emisiones (agricultura, transporte e industria) y a los sectores relevantes por su peso económico (servicios privados y públicos). La figura 1 recoge los agentes y flujos existentes.

Las emisiones de GEI consideradas son las sujetas a control por el Protocolo de Kioto: dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), monóxido de nitrógeno (N_2O) y gases fluorados (SF_6 , HFC, PFC). Estas emisiones se agrupan

FIGURA 1. *Estructura general del modelo*



en dos bloques; emisiones de combustión y emisiones de proceso. Las emisiones de combustión proceden directamente de la quema de combustibles fósiles, mientras que las emisiones de proceso se originan a lo largo del proceso de productivo.

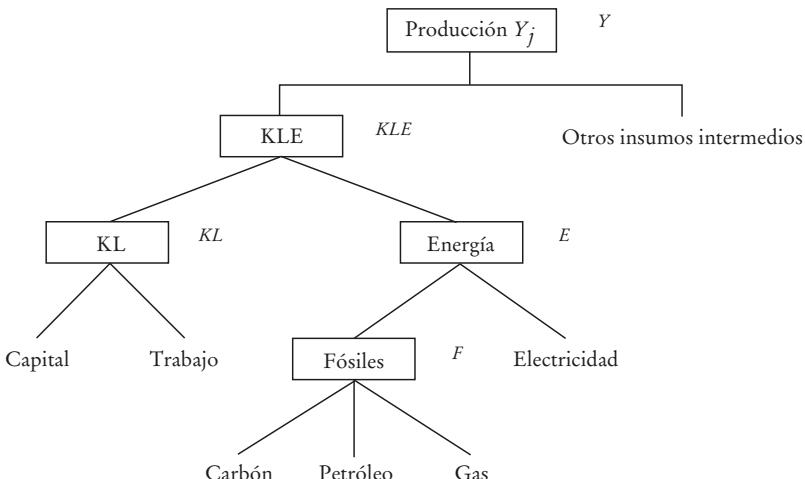
1. Productores

Cada sector productivo, $j = 1, \dots, J$, produce un bien homogéneo con una tecnología caracterizada por funciones CES anidadas. La producción de cada sector (Y_j) en cada momento t se obtiene combinando insumos intermedios ($Y_{l,j,t}^{ID}$), capital ($K_{j,t}$), trabajo ($L_{j,t}$) y emisiones ($E_{j,t}^P$). Las emisiones son un factor productivo más, ya que van asociadas a un permiso de emisión que tiene un precio de mercado. La ecuación (1) recoge la función de producción y la figura 2 representa su estructura.¹ Los parámetros α denotan las elasticidades de sustitución entre insumos.

$$Y_{j,t} = f(Y_{l,j,t}^{ID}, \dots, Y_{f,j,t}^{ID}; K_{j,t}; L_{j,t}; E_{j,t}^P; \alpha^Y, \alpha_{KL}, \dots, \alpha^F), \quad (j,t) \quad (1)$$

Los productores maximizan ganancias sujetos a las restricciones tecnológicas descritas. La ganancia neta de impuestos en equilibrio es nula; es decir, el

FIGURA 2. *Estructura general de la función de producción*



¹ Es habitual en un MEGA representar gráficamente las funciones de producción para evitar su compleja extensión algebraica. En el apéndice se recoge esta función más pormenorizadamente.

valor de los productos será igual al valor de los insumos utilizados. Esta condición se recoge en la ecuación (2), en la que $P_{j,t}$ es el precio del producto del sector j , $P_{K,t}$ representa el precio del capital, $P_{L,t}$ del trabajo y $P_{E,t}$ denota el precio de los permisos. Finalmente, $\frac{P}{j}$ y $\frac{L}{j}$ son las tasas impositivas sectoriales de la producción y el trabajo.

$$(P_{j,t} - \frac{P}{j}) Y_{j,t} - [P_{j,t} Y_{jj,j,t}^{ID} - P_{K,t} K_{j,t} - (P_{L,t} - \frac{L}{j}) L_{j,t} - P_{E,t} E_{j,t}^P] = 0, \quad (j,t) \quad (2)$$

2. Consumidores

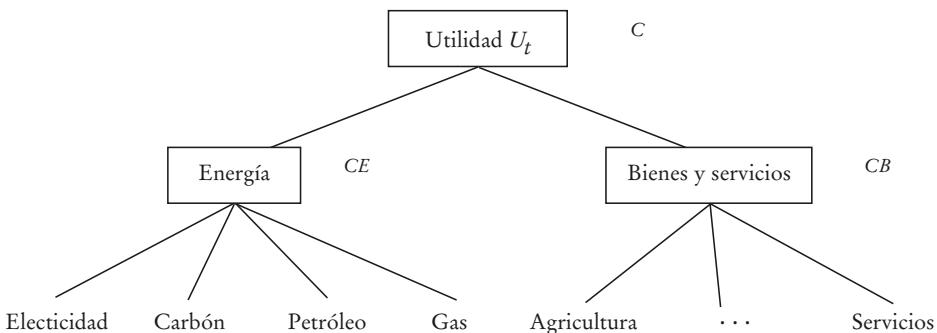
El modelo considera un consumidor representativo propietario de los factores de producción. Las preferencias de los consumidores se definen mediante una función de utilidad CES anidada de los diferentes bienes de consumo j en el periodo t ($C_{1,t}, \dots, C_{J,t}$), junto a sus respectivas elasticidades de sustitución [véase ecuación (3) y figura 3]. Finalmente, la utilidad total (U), ecuación (4), es la agregación de las utilidades intertemporales (U_t) y la elasticidad de sustitución intertemporal (U) es la variable que modula las preferencias del consumidor entre utilidad presente y futura. La función de utilidad no recoge las ganancias futuras provenientes de los daños evitados del CC.

$$U_t = CES(C_{1,t}, \dots, C_{J,t}; C, CE, CB), \quad t \quad (3)$$

$$U = CES(U_1, \dots, U_t; U) \quad (4)$$

El consumidor maximiza la utilidad total sujeto a su restricción presupuestaria. Como se recoge en la ecuación (5), el ingreso obtenido en cada periodo t de las rentas del trabajo, del capital y de las transferencias directas del

FIGURA 3. Estructura de la función de utilidad



gobierno (T_t), debe ser igual al gasto destinado a consumo ($C_{j,t}$), pago de impuestos ($\frac{C}{j}$), compra de permisos de emisión (E_t^C) y ahorro (S_t). Los consumidores también generan emisiones de GEI y, por tanto, también tienen que adquirir permisos de emisión.

$$P_{K,t} K_t P_{L,t} L_t T_t \sum_{j=1}^J (P_{j,t} \frac{C}{j}) C_{j,t} P_{E,t} E_t^C S_t, \quad t \quad (5)$$

3. Gobierno

El gobierno obtiene sus ingresos mediante la recaudación de impuestos de la producción, el trabajo y el consumo, y también mediante los permisos de emisión; siendo E_t la suma de las emisiones de los productores y consumidores y $P_{E,t}$ el precio del permiso en el periodo t . Los ingresos permiten ofrecer bienes y servicios públicos $G_{j,t}$ y realizar transferencias a los consumidores (T) de manera que el déficit público sea siempre 0 [véase ecuación (6)]. Por otro lado, las preferencias del gobierno se modelan por medio de una función Leontief, lo que permite mantener la estructura de gasto público fija [ecuación (5)]. Los ingresos extras obtenidos por los permisos de emisión se canalizan mediante transferencias (T), de manera que el gasto público no varíe.

$$\cdot \quad \overline{G} = \text{Leontief}(G_{1,1}, \dots, G_{J,t}), \quad (t) \quad (6)$$

$$P_{E,t} E_t \sum_{j=1}^J (P_{L,t}^L L_{j,t} P_{j,t}^C C_{j,t} P_{j,t}^P Y_{j,t}) \sum_{j=1}^J P_{j,t} G_{j,t} T_t, \quad t \quad (7)$$

4. Sector exterior

Para percibir las relaciones económicas en el entorno hemos agrupado a todos los países en un único agregado llamado “resto del mundo”, y, de todos los flujos existentes, consideramos únicamente las importaciones y exportaciones de bienes y servicios.

En el comercio internacional se modela con dos supuestos habituales en un MEGA: el supuesto de economía pequeña y abierta y el supuesto de Armington. El primer supuesto establece que *i*) la economía interna es demasiado pequeña para influir en los precios mundiales y *ii*) las necesidades de importación y exportación pueden ser satisfechas mediante el comercio con el resto del mundo. El supuesto de Armington establece que los bienes na-

cionales y los importados/exportados son sustitutos imperfectos (Armington, 1969). En la práctica esto supone modelar la oferta total ($Y_{j,t}^{TS}$) como una función CES [ecuación (8)], que agrega la producción interna ($Y_{j,t}^D$) y las importaciones ($M_{j,t}$), y la demanda total ($Y_{j,t}^{TD}$) como una función de transformación o función CET [ecuación (9)], que se divide entre demanda interna ($Y_{j,t}^D$) y exportaciones ($X_{j,t}$).

$$Y_{j,t}^{TS} = CES(Y_{j,t}, M_{j,t}), \quad (j, t) \quad (8)$$

$$Y_{j,t}^{TD} = CET(Y_{j,t}^D, X_{j,t}), \quad (j, t) \quad (9)$$

Finalmente, y como condición de cierre del modelo, suponemos que el déficit comercial (XD_t , importaciones menos exportaciones totales), no varía y se financia con presupuesto de los consumidores [ecuación (10)], siendo $P_{X,t}$ la variable de ajuste.

$$\sum_{j=1}^J P_{X,t}(M_{j,t} - X_{j,t}) = \overline{XD}_t, \quad (t) \quad (10)$$

5. Crecimiento económico y cambio tecnológico

El crecimiento económico proviene del aumento del factor trabajo (exógeno) y del incremento del factor capital (endógeno). La oferta de trabajo está dada en el año de referencia inicial (\bar{L}_0) y crece a una tasa constante g [ecuación (11)]. El acervo de capital también está dado en el año inicial (\bar{K}_0), pero su crecimiento [ecuación (11)] depende de la tasa de depreciación del capital (δ) y de la inversión (I_t), que en último término depende de la decisión entre ahorro y consumo.

$$\bar{L}_{t+1} = \bar{L}_t (1 + g), \quad (t) \quad (11)$$

$$\bar{K}_{t+1} = \bar{K}_t (1 - \delta) + I_t, \quad (t) \quad (12)$$

En un modelo dinámico, y para evitar que el acervo de capital sea consumido por completo en el último periodo, es necesario utilizar una condición de transversalidad. Esto supone aproximar un modelo de horizonte infinito a otro de horizonte finito. bibliografía propone diferentes reglas para que la distorsión de esta condición sea mínima y, en este caso, se adopta la más habitual en la bibliografía de MEGA [ecuación (12)], la que establece que el crecimiento de la inversión y de la utilidad en el último periodo (T) debe ser

idéntica. En Lau *et al* (2002) podemos encontrar una demostración de los efectos mínimos de esta condición en las sendas óptimas.

$$\frac{I_T}{I_{T-1}} = \frac{U_{T,priv}}{U_{T-1,priv}} \quad (13)$$

El progreso tecnológico en este modelo es exógeno y depende de un parámetro (α_t) que mide las mejoras futuras en eficiencia de emisiones o GEI, es decir, en la generación de emisiones por unidad de producto. Este parámetro sigue una función logística propia de los procesos de difusión tecnológica [ecuación (14)]: se parte de un valor inicial en t_0 , que aumenta de manera exponencial y que finalmente se estabiliza en t_f . Su valor inicial y final es diferente para las emisiones de combustión (α_t^C) y proceso (α_t^P), ya que la evolución y perspectivas tecnológicas difieren.

$$\alpha_t = \text{if } \frac{1}{1 - (\alpha_{if}/\alpha_{to} - 1) e^{-t}} \quad (14)$$

6. Emisiones y política ambiental

Las emisiones totales (E_t) se calculan como la suma de las emisiones de los productores (E_t^P) y consumidores (E_t^C) en cada periodo. Cada una de ellas se obtiene a su vez sumando las emisiones de combustión y las de proceso. Las emisiones de combustión están asociadas mediante coeficientes (y_e) al uso de carbón, petróleo y gas, mientras que las de proceso están asociadas mediante coeficientes (x_j , z) a la producción final. Estas emisiones están corregidas en cada periodo por el parámetro de progreso tecnológico (α_t^C , α_t^P).

$$E_t^P = \sum_{e=1}^3 \sum_{j=1}^J Y_{e,j,t}^{ID} \alpha_t^P \sum_{j=1}^J x_j Y_{j,t}, \quad t \quad (15)$$

$$E_t^C = \sum_{e=1}^3 \sum_{j=1}^J C_{e,t} \alpha_t^C z_j C_{j,t}, \quad t \quad (16)$$

Las posibilidades de reducir emisiones de combustión son limitadas, ya que la quema de combustibles fósiles genera inevitablemente emisiones de CO₂.²

² En un futuro las tecnologías de captura y almacenamiento de carbono (CAC) pueden cambiar este hecho. En cualquier caso esta tecnología supondría el almacenamiento de las emisiones en depósitos, que no su eliminación.

En el contexto de este modelo, las emisiones de combustión pueden reducirse, sin embargo, de manera inducida. Las variaciones en los precios relativos de los factores originan cambios en *i*) el *mix* energético, sustituyendo combustibles fósiles más intensivos en CO₂ por otros menos intensivos, *ii*) en las funciones producción y utilidad, sustituyendo el uso de energía por otros insumos y *iii*) en la estructura económica, modificando las pautas de consumo hacia productos bajos en carbono. Por último, y cuando todas las posibilidades de sustitución han sido explotadas, la única manera de reducir emisiones de combustión es *iv*) disminuyendo la actividad económica a ellas asociada.

Para las emisiones de proceso existen diferentes posibilidades de reducción que implican la instalación de filtros o cambios integrales en los procesos productivos. Para captar este hecho, y según a Reilly *et al* (2002), utilizamos una función CES, que permite modelar el grado de sustituibilidad entre producción ($Y_{j,t}$) y emisiones de proceso ($E_{j,t}^P$). En Hyman *et al* (2003) encontramos una estimación de los valores de este parámetro (β).

$$Y_{j,t} = CES(Y_{j,t}, E_{j,t}^P; \beta) \quad (17)$$

7. Equilibrio y solución

El concepto de equilibrio utilizado se corresponde con la noción walrasiana tradicional; las cantidades ofertadas son iguales a las cantidades demandadas y todos los agentes cumplen con sus planes de optimización, actuando los precios como variables de ajuste. En nuestro caso, esto supone un equilibrio en el mercado de bienes y servicios [ecuación (17)], en el mercado de trabajo y capital [ecuación (18) y (19)] y también entre el ahorro y la inversión [ecuación (20)]. Por último, las emisiones totales deben ser iguales al número de permisos puestos en circulación [ecuación (21)].

$$Y_{j,t}^{DD} = \sum_{jj=1}^J Y_{j,jj,t}^{ID} - C_{j,t} - G_{j,t} - I_{j,t} \quad (17)$$

$$\sum_{j=1}^J L_{j,t} = \bar{L}_t \quad (18)$$

$$\sum_{j=1}^J K_{j,t} = K_t \quad (19)$$

$$S_t \quad \sum_{j=1}^J P_{j,t} I_{j,t} \quad \overline{XD}_t \quad (20)$$

$$\bar{E}_t \quad E_t^P \quad E_t^C \quad (21)$$

Encontrar las soluciones de equilibrio implica resolver un sistema dinámico y finito de ecuaciones no lineales. Para la programación del modelo se ha utilizado el lenguaje GAMS/MPSGE y para su resolución el algoritmo PATH (Dirkse *et al.*, 1995).

III. UNA APLICACIÓN: EL CASO DE ESPAÑA

A continuación se recoge una aplicación del modelo para el caso particular de España. Para ello se analiza los objetivos de España en cuanto a la mitigación de emisiones con base en Protocolo de Kioto. Para ello, se calibra el modelo y se establecen los panoramas por comparar.

1. *Datos y calibración*

Para calibrar el modelo se utiliza una matriz de contabilidad social (o SAM) para España que integra la información de la tabla insumo producto (INE, 2002a) y la información de los saldos energéticos sectoriales (véase cuadros A1 y A2 del apéndice). La integración de ambos cuadros permite conocer los flujos energéticos subyacentes en la TIO y calcular las emisiones de CO₂. La reacción de los agentes ante los cambios se recoge por medio de las elasticidades que provienen del modelo MIT-EPPA (Babiker *et al.*, 2001, apéndices). Asimismo, se asigna a la tasa de crecimiento (*g*) y a la depreciación del capital () una valor de 2.5 y 5%, respectivamente, similar a la tasa media en España durante el periodo 1990-2005.

Las emisiones de combustión en el año base se calculan con los coeficientes para el carbón, petróleo y gas natural (Eurostat, 2005). También se ha considerado usos distintos a la combustión (cuadro A3). Las emisiones de proceso se obtienen como diferencia entre las emisiones de combustión estimadas y las emisiones totales de las Cuentas Ambientales Nacionales (INE, 2002b). Las emisiones futuras dependen de un parámetro de cambio tecnológico exógeno. Para ello, suponemos una convergencia siguiendo una función logística hacia los valores de la bibliografía (Weyant, 1999; Weyant y

(Chesnay, 2006): 1.5% de eficiencia anual en emisiones de proceso y 1% en emisiones de combustión.

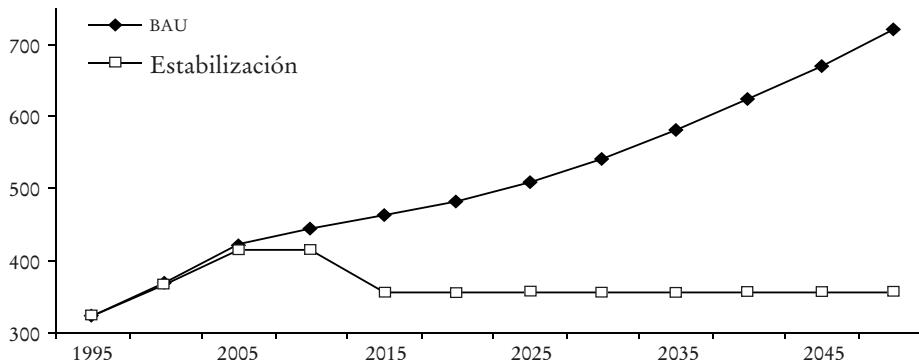
2. Panoramas

La gráfica 1 recoge la evolución de las emisiones de GEI en dos panoramas. La comparación entre ambos nos permitirá obtener los efectos provenientes del control de las emisiones de GEI: i) panorama *Business as Usual* (BAU), en el que no existe una limitación o control de las emisiones, y ii) *panorama de estabilización*, que representa una extensión hasta 2050 de los objetivos del Protocolo de Kioto en España. Esto supone reducir y estabilizar las emisiones para el periodo 2008-2012 para que no superen el 15% las emisiones de 1990.

Las emisiones en el panorama BAU crecerán hasta alcanzar 719 millones de toneladas de CO₂ equivalente (MtCO₂ eq.) en 2050, mientras que el panorama de estabilización se limitarían a 357 MtCO₂ eq. El ritmo de reducción de emisiones se basa en las previsiones de los Planes Nacionales de Asignación (PNA 2006), una primera fase de mantenimiento de las emisiones (2005-2007) que coincide con la puesta en marcha del primer periodo EU ETS, y otra posterior de reducción más intensa (2008-2012). La reducción de emisiones del panorama de estabilización respecto al de BAU en 2020 es de 25% y de 51% en 2050.

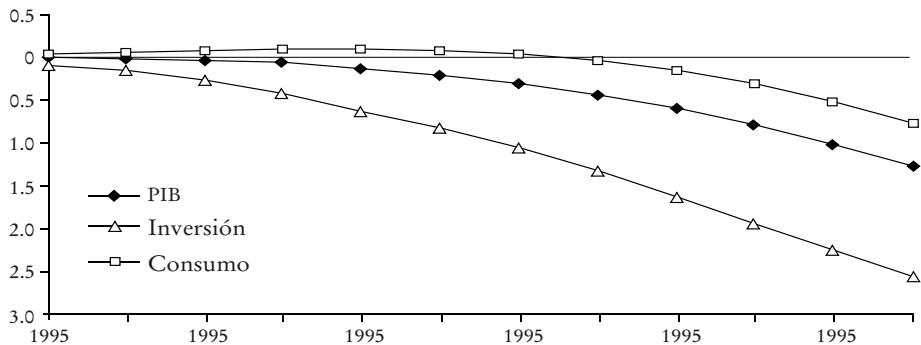
a) *Análisis de resultados*. Los resultados del panorama de estabilización de la gráfica 2 muestran que las variables macroeconómicas principales (PIB,

GRÁFICA 1. *Evolución de emisiones de GEI con los programas BAU y de estabilización (MtCO₂eq.)*



GRÁFICA 2. Variación en consumo, inversión y PIB en el panorama de estabilización respecto a BAU

(Porcentaje)



producción y consumo privado) son en 2050 inferiores al panorama BAU. Esto supone que reducir las emisiones tiene un costo frente la opción de emitir sin restricciones. La utilidad total entre 1995-2050 es de 0.31% inferior al panorama BAU, y el PIB, por ejemplo, disminuye progresivamente hasta alcanzar una reducción de 1.2% en 2050.

En un modelo tipo Ramsey como el considerado el anuncio de una política ambiental puede hacer que el consumo y las emisiones aumenten inicialmente (Bye, 2000). Los agentes anticipan la política y ajustan su comportamiento de cara a maximizar su utilidad. Una elección óptima hace desplazar mayor consumo al presente, en el que genera una mayor utilidad, aunque existen limitaciones, ya que un mayor consumo presente supone un menor ahorro, una menor acumulación de capital y, por tanto, un menor consumo futuro.

b) *Resultados sectoriales.* La desagregación sectorial es importante, ya que las políticas de mitigación tienen efectos muy diversos. En un MEGA los factores de producción son exógenos y, por tanto, los cambios sectoriales deben entenderse como un desplazamiento de recursos de unos sectores a otros que, con la política ambiental, resultan más rentables. Los efectos sectoriales surgen de una combinación de efectos respecto a la oferta, en la que los sectores más intensivos en emisiones sufren un aumento en sus costos de producción y, respecto a la demanda, en la que el precio más alto de los productos intensivos en emisiones hace disminuir su consumo. También influyen toda una serie de efectos indirectos e inducidos que se materializan en un cambio en la estructura económica, lo que da un mayor peso a los sectores y productos con una menor intensidad en GEI.

CUADRO 1. Variación en la producción sectorial con el panorama de estabilización respecto a BAU

(Porcentaje)

Sectores	2030	2050
1. Agricultura	0.83	2.61
2. Extr. carbón	39.75	65.21
3. Extr. crudo y gas	17.38	38.12
4. Extr. otros minerales	0.55	0.98
5. Ind. alimentos	0.74	2.43
6. Ind. textil y cuero	0.76	2.43
7. Ind. madera y papel	0.69	1.86
8. Ind. refinación de petróleo	17.16	36.32
9. Ind. química	0.84	2.13
10. Ind. metálica	1.26	2.74
11. Ind. maquinaria	0.77	1.46
12. Ind. resto	1.44	3.34
13. Electricidad	5.06	11.24
14. Gas natural	9.34	24.75
15. Distribución agua	0.41	1.48
16. Construcción	1.08	2.17
17. Trans. terrestre	1.13	2.94
18. Trans. marítimo	1.56	4.01
19. Trans. aéreo	1.39	3.73
20. Anexos trans.	0.74	1.99
21. Serv. comerciales	0.23	0.87
22. Serv. no comerciales	0.06	0.05

El cuadro 1 muestra el efecto en la producción de los 22 sectores analizados en 2030 y 2050 respecto al panorama BAU. Los sectores más que afectados son los energéticos debido al aumento del precio relativo de los combustibles fósiles. Por otra parte, el efecto en los sectores servicios es casi nulo; el sector servicios no comerciales incluso aumenta su producción. El sector transporte marítimo también aumenta su actividad, ya que, aunque este sector es más intensivo en GEI que otros, lo es menos que sus sustitutos más cercanos (transporte terrestre y aéreo). Esto hace que gran parte de la actividad de transporte se canalice por medio de este sector. Esto es un buen ejemplo de la importancia que tiene considerar los efectos indirectos en las políticas de mitigación.

c) *Otros resultados: energía y permisos de emisión.* El cuadro 2 recoge la variación en el consumo de energía desagregado por tipos de combustibles. Ilustra cómo las políticas de mitigación condicionan el *mix* energético y sustituyen los combustibles más intensivos en GEI. Finalmente, en 2050 el

CUADRO 2. Variación en el consumo de energía con el panorama de estabilización respecto a BAU

(Porcentaje)

	2010	2030	2050
<i>Consumo energético agregado</i>			
Total	0.06	11.1	23.4
Productores	0.14	14.9	30.3
Consumidores	0.04	4.36	11.0
<i>Consumo por tipo de energía</i>			
Carbón	0.10	38.2	63.2
Petróleo	0.57	17.2	36.5
Gas natural	1.10	9.4	24.3
Electricidad	0.69	5.0	11.1

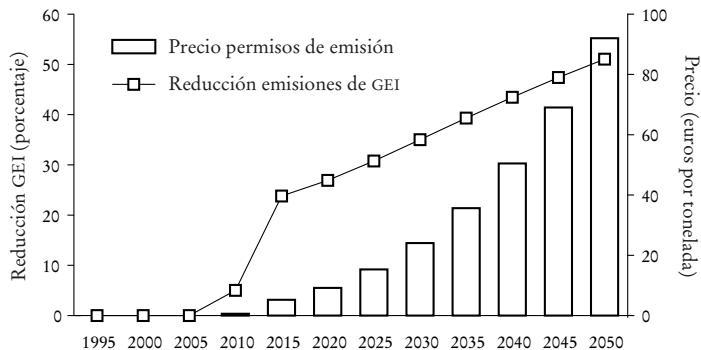
consumo de carbón se reduce respecto al panorama BAU 63%, el petróleo en 36%, el gas natural en 24% y la electricidad en 11%. En un inicio, la mayor parte de la reducción proviene de las emisiones de proceso, pero a medida que los objetivos son más intensos la reducción provendrá de las emisiones de combustión. Es entonces cuando los cambios en el *mix* energético son más apreciables.

A partir de los resultados de un MEGA podemos obtener implícitamente las curvas de costos marginales de reducción de emisiones (CMR). La solución del modelo permite obtener reducciones de las emisiones costo-efectivas, es decir, en equilibrio el CMR para todos los agentes será idéntico y este será precisamente el precio de los permisos de emisión (Ellerman *et al.*, 1998). Una de las ventajas de obtener las curvas de CMR por medio de un MEGA es que incorporan los costos directos e indirectos, algo que los estudios puramente tecnológicos suelen soslayar.

El precio de los permisos (gráfica 3) es nulo en un inicio bajo, pero a medida que los objetivos son más intensos el precio aumenta hasta alcanzar los 92 euros por tonelada en 2050. La evolución de los precios y los objetivos de reducción ilustra cómo el costo de reducir emisiones aumenta más que proporcionalmente, ya que las mejores opciones tecnológicas son más utilizadas. El gran salto que se observa en el periodo 2010-2015 se debe a la planeación prevista para la reducción de emisiones considerada por el Plan Nacional de Asignación español (PNA, 2006).

d) *Análisis de sensibilidad.* El panorama de estabilización plantea una estatización de las emisiones en 2050 en 15% superior a las de 1990, como re-

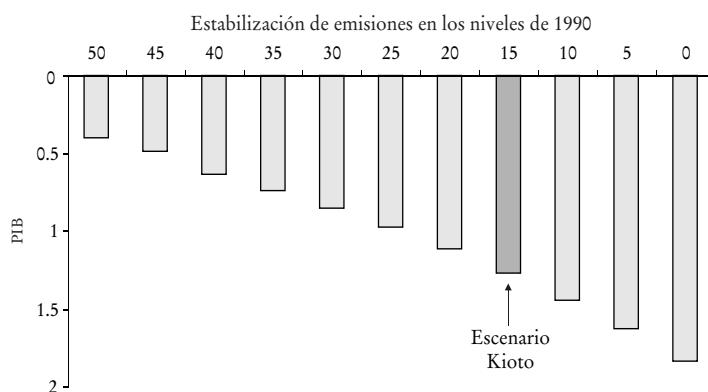
GRÁFICA 3. Precio de los permisos de emisión y reducción de GEI con el panorama de estabilización respecto a BAU



quiere el Protocolo de Kioto. El análisis de sensibilidad realizado varía esta cifra desde el 0% (es decir estabilizar las emisiones en los niveles de 1990) hasta 50% de incremento. Conviene señalar que en el panorama BAU las emisiones aumentarían en 2050 253% y que en 2007 éstas ya se situaban en 52% por encima de las de 1990, convirtiendo a España en el país europeo más alejado de sus objetivos.

Los resultados (gráfica 4) muestran que a medida que se endurecen los objetivos de reducción de GEI, los costos de mitigación en términos del PIB aumentan. Estabilizar las emisiones entre un 50 y 0% de incremento respecto a las de 1990 supone para el año 2050 una reducción del PIB entre 0.4 y

GRÁFICA 4. Reducción del PIB en 2050 y estabilización de emisiones respecto al panorama BAU
(Porcentaje)



1.8%. Estos costos aumentan más que proporcionalmente, ya que observamos que un incremento de 50% en los objetivos de estabilización aumenta los costos 456 por ciento

CONCLUSIONES

Este artículo contextualiza los modelos más utilizados hasta la fecha en el campo de la política climática y presenta un modelo de equilibrio general aplicado (MEGA) que permite simular un mercado de permisos de emisión y analizar políticas de mitigación de emisiones. El modelo se aplica al caso de España en la línea de los objetivos de estabilización del Protocolo de Kioto.

La primera conclusión una vez analizada la amplia tipología de modelos y su evolución es que para estimar efectos de la mitigación de emisiones es necesaria una aproximación multidisciplinaria respecto al uso de modelos. Los modelos existentes son complementarios y pueden ser utilizados para cuestiones muy diversas. En el caso de un MEGA su mayor utilidad se encuentra en el análisis de políticas en el largo plazo con efectos generales en la economía.

Las conclusiones de la aplicación de un MEGA en España están de acuerdo con la bibliografía (IPCC, 2007), con las particularidades propias de la economía española, a el uso de dinámica tipo Ramsey y la consideración de todas las emisiones de GEI. En general, y salvo excepciones en los modelos tecnológicos, reducir las emisiones de GEI supone un costo. Sin embargo, la sustitución de combustibles y otros insumos, los cambios en los procesos productivos, en las pautas de producción y consumo o las mejoras tecnológicas podrían mantener estos costos dentro de unos límites razonables. En el caso de España, por ejemplo, estabilizar las emisiones en los límites fijados por el Protocolo supondría una reducción del PIB de alrededor 1% en 2050.

El anuncio de una política ambiental (como el EU ETS) hace que inicialmente las emisiones aumenten debido a un desplazamiento del consumo hacia el presente. También, aunque no se ha estudiado en este trabajo, existe un comportamiento estratégico relacionado con la toma de posiciones en función del reparto de los permisos. Se observa que cualquier política de mitigación induce un cambio del *mix* energético hacia tecnologías bajas en carbono. El aumento del precio de la energía fósil hace que los efectos sectoriales sean muy diversos, lo que genera perdedores (sector energético, industrias intensivas en energía y materiales) y ganadores (sector servicios).

Para situar estos resultados en perspectiva, es necesario conocer algunas de las características y limitaciones del modelo. En primer lugar, el marco de análisis utilizado supone agentes racionales, mercados perfectamente competitivos y factores perfectamente móviles entre sectores. En segundo lugar, la tecnología utilizada es exógena (Löchel, 2002) y, en tercer lugar, sólo se analizan los costos de mitigación, sin incorporar los daños o costos del CC (costos de “no actuar”), los flujos del carbono, el papel de los sumideros y el papel de las políticas de adaptación.

Por último, hay que considerar que el modelo no incorpora los costos de transacción, supervisión y control por su dificultad de modelización (Krutilla, 1999; McCann *et al*, 2005). El análisis es útil para conocer el costo mínimo de reducir emisiones, pero no para una elección de instrumentos. En el campo de los instrumentos generalmente una solución razonable pasa por una utilización mixta. En la mitigación del CO₂ la solución apunta hacia un mercado de permisos para sectores intensivos en energía (similar al EU ETS), un impuesto lo más cercano posible al CO₂ para los sectores difusos, como el transporte o residencial, y otro tipo de medidas de regulación, normas y estándares. En cualquier caso, este trabajo ha querido subrayar la importancia que tiene el análisis económico y la modelización para la correcta elaboración de las políticas climáticas que van a ser cada vez más necesarias en la economía baja en carbono del futuro.

APÉNDICE

Ecuaciones del modelo y notación científica

1. Productores

Funciones de producción por sectores³ (j, t)

$$Y_{j,t} = f(Y_{1,j,t}^{ID}, \dots, Y_{J,j,t}^{ID}; K_{j,t}; L_{j,t}; E_{j,t}^P; Y, KEL, KL, E, E^1) \quad (A1)$$

Condición de beneficio cero por sectores (j, t)

$$(P_{j,t} - \frac{P}{j}) Y_{j,t} - P_{j,t} Y_{jj,j,t}^{ID} - P_{K,t} K_{j,t} - (P_{L,t} - \frac{L}{j}) L_{j,t} - P_{E,t} E_{j,t}^P = 0 \quad (A2)$$

³ La estructura anidada de producción se representa gráficamente en la figura 2. La ecuación (A1) es una manera reducida de presentar dichas funciones, mediante los insumos y las elasticidades, para evitar su gran extensión algebraica. A modo de ejemplo; una función CES para el caso de dos niveles de anidamiento y dos insumos tiene la siguiente forma. El primer nivel: $Y = CES(X_1, X_2; \alpha_1 X_1^{-1/\alpha_2} + \alpha_2 X_2^{-1/\alpha_1})^{1/\alpha_1}$ y el segundo nivel: $X_2 = CES(X_3, X_4; \alpha_3 X_3^{-1/\alpha_4} + \alpha_4 X_4^{-1/\alpha_3})^{1/\alpha_3}$, en que $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ son parámetros, y representan las elasticidades de sustitución entre los insumos.

2. Consumidores

Función de utilidad total intertemporal

$$U = CES(U_1, \dots, U_t; \alpha) \quad (A3)$$

Función de utilidad instantánea t

$$U_t = f(C_{1,t}, \dots, C_{J,t}; \alpha^C, \alpha^F, \alpha^G) \quad (A4)$$

Condición de equilibrio presupuestario t

$$[P_{K,t} \ K_t \ P_{L,t} \ L_t \ T_t] - \sum_{j=1}^J (P_{j,t} \ C_{j,t}) = P_{E,t} \ E_t^C + S_t = 0 \quad (A5)$$

3. Gobierno

Consumo público del gobierno

$$\bar{G}_t = CES(G_{1,t}, \dots, G_{J,t}) \quad (A6)$$

Condición de equilibrio presupuestario

$$P_{E,t} (E_t^P - E_t^C) - \sum_{j=1}^J (P_{L,t} \ L_{j,t} - P_{j,t} \ C_{j,t} - P_{j,t} \ Y_{j,t}) = \sum_{j=1}^J P_{j,t} \ \bar{G}_{j,t} - T \quad (A7)$$

4. Comercio internacional

Función de Armington entre bienes importados e internos⁴ (j, t)

$$Y_{jt}^{TS} = CES(Y_{j,t}, M_{j,t}; \alpha^A) \quad (A8)$$

Función de transformación entre bienes exportados e internos (j, t)

$$Y_{jt}^{TD} = CET(Y_{j,t}^D, X_{j,t}; \alpha^T) \quad (A9)$$

Cierre del modelo con el resto del mundo t

$$\sum_{j=1}^J P_{X,t} (M_{j,t} - X_{j,t}) = \bar{XD}_t \quad (A10)$$

⁴ La estructura anidada del comercio se representa gráficamente en la figura 3.

5. Crecimiento y progreso tecnológico

Crecimiento exógeno de la oferta efectiva de trabajo t

$$\bar{L}_t = \bar{L}_{t-1} (1 - g) \quad (\text{A11})$$

Crecimiento endógeno del acervo de capital t

$$K_t = K_{t-1} (1 - \delta) + I_t \quad (\text{A12})$$

Condición de transversalidad para el acervo final de capital t

$$\frac{I_T}{I_{T-1}} = \frac{U_{T,priv}}{U_{T-1,priv}} \quad (\text{A13})$$

Progreso tecnológico para emisiones de combustión y proceso

$$\frac{t}{t_0} = \frac{tf}{t_0} \frac{1}{1 - (if/t_0 - 1) e^{-t}} \quad (\text{A14})$$

6. Emisiones

Emisiones de productores t

$$E_t^P = \frac{C_t}{e^{t-1}} = \frac{C_t^3}{e^{3(t-1)}} = \frac{\sum_{j=1}^J Y_{e,j,t}^{ID}}{\sum_{j=1}^J x_j Y_{j,t}} \quad (\text{A15})$$

Emisiones de consumidores t

$$E_t^C = \frac{C_t}{e^{t-1}} = \frac{C_t^3}{e^{3(t-1)}} = \frac{\sum_{j=1}^J C_{e,t}}{\sum_{j=1}^J C_{j,t}} \quad (\text{A16})$$

Reducción de emisiones de proceso de productores (j, t)

$$Y_{j,t}^A = CES(Y_{j,t}^A, E_{j,t}^{PR}; \beta) \quad (\text{A17})$$

7. Condiciones de equilibrio de mercado

De bienes y servicios (j, t)

$$Y_{j,t}^{DD} = \frac{\sum_{jj=1}^J Y_{j,jj,t}^{ID}}{C_{j,t}} = G_{j,t} / I_{j,t} \quad (\text{A18})$$

De mercado de capital t

$$\begin{matrix} & J \\ & K_{j,t} \quad K_t \\ j & 1 \end{matrix} \quad (A19)$$

De mercado de trabajo t

$$\begin{matrix} & J \\ & L_{j,t} \quad \bar{L}_t \\ j & 1 \end{matrix} \quad (A20)$$

De mercado de ahorro/inversión t

$$\begin{matrix} & J \\ S_t & P_{j,t} \quad I_{j,t} \quad \bar{XD}_t \\ j & 1 \end{matrix} \quad (A21)$$

De mercado de permisos de emisión

$$\bar{E}_t \quad E_t^P \quad E_t^C \quad (A22)$$

SÍMBOLOS

Índices

Nombre	Entradas	Descripción
j, jj	$1, \dots, J$	Sectores/bienes y servicios
t	$1, \dots, T$	Periodos
e	Carbón, petróleo, gas	Combustibles fósiles

Parámetros

Nombre	Descripción
g	Tasa de crecimiento de la oferta efectiva de trabajo Tasa de depreciación del capital
Y	Elasticidad de sustitución entre energía-capital-trabajo y materiales
KLE	Elasticidad de sustitución entre energía y capital-trabajo
KL	Elasticidad de sustitución entre capital y trabajo
E	Elasticidad de sustitución entre electricidad y combustibles fósiles
$E1$	Elasticidad de sustitución entre carbón, petróleo y gas natural
U	Elasticidad de sustitución intertemporal de la utilidad instantánea
C	Elasticidad de sustitución en el consumo entre bienes energéticos y no energéticos
F	Elasticidad de sustitución en el consumo entre bienes energéticos

G	Elasticidad de sustitución en el consumo entre bienes no energéticos
B	Elasticidad de sustitución entre producción/consumo y emisiones de proceso
A	Elasticidad de sustitución entre bienes importados e internos
T	Elasticidad de transformación entre bienes exportados e internos
L_j	Tasa impositiva en el trabajo en el sector j
P_j	Tasas impositiva en la producción en el sector j
C_j	Tasa impositiva en el consumo en el bien j
T_t	Transferencias entre consumidores y gobierno en el periodo t
e_e	Coeficientes de emisión de combustión para los productores en el combustible e
e_c	Coeficientes de emisión de combustión para los consumidores en el combustible e
x_j	Coeficientes de emisión de proceso para el sector j
z	Coeficientes de emisión de proceso para el consumidor representativo
C_t	Ecoeficiencia de combustión en el periodo t
P_t	Ecoeficiencia de proceso en el periodo t

Variables endógenas

Nombre	Descripción
$Y_{j,t}$	Producción del sector j en el periodo t
$Y_{j,t}^A$	Producción del sector j en el periodo t antes del abatimiento en las emisiones de proceso
$Y_{j,jj,t}^{ID}$	Demanda intermedia del insumo jj en el sector j y en el periodo t
$Y_{j,t}^D$	Demanda interna del bien j en el periodo t
$Y_{j,t}^{TS}$	Oferta total del bien j en el periodo t
$Y_{j,t}^{TD}$	Demanda total del bien j en el periodo t
$M_{j,t}$	Importaciones del bien j en el periodo t
$X_{j,t}$	Exportaciones del bien j en el periodo t
$K_{j,t}$	Demandas de capital del sector j en el periodo t
$L_{j,t}$	Demandas de trabajo del sector j en el periodo t
U	Utilidad total consumidores
U_t	Utilidad consumidores en el periodo t
U_t^A	Utilidad consumidores en el periodo t antes del abatimiento de las emisiones de proceso
$C_{j,t}$	Consumo privado del bien j en el periodo t

$G_{j,t}$	Consumo público del bien j en el periodo t
S_t	Ahorro en el periodo t
$I_{j,t}$	Inversión en el sector j en el periodo t
K_t	Demanda de capital en el periodo t
$P_{j,t}$	Precio de equilibrio del bien j en el periodo t
$P_{k,t}$	Precio de equilibrio del capital en el periodo t
$P_{L,t}$	Precio de equilibrio del salario en el periodo t
$P_{E,t}$	Precio de equilibrio de los permisos de emisión en el periodo t
$P_{X,t}$	Tasa de intercambio o precio de equilibrio en el comercio internacional en el periodo t
$P_{I,t}$	Precio de equilibrio de la inversión en el periodo t
$E_{j,t}^P$	Emisiones de productores en el periodo t
E_t^C	Emisiones de consumidores en el periodo t
$E_{J,t}^{PR}$	Emisiones de proceso productores en el periodo t
E_t^{PR}	Emisiones de proceso consumidores en el periodo t

Variables exógenas

Nombre	Descripción
\overline{XD}_t	Déficit de comercio en el periodo t
\overline{G}_t	Consumo público total en el periodo t
\overline{K}_0	Oferta de capital en el periodo inicial
\overline{L}_t	Oferta de trabajo en el periodo t
\overline{E}_t	Emisiones totales o permisos de emisión totales

CUADRO A1. SAM energética para España

(Millones de euros)

CUADRO A1 (*conclusión*)

	<i>Y15</i>	<i>Y16</i>	<i>Y17</i>	<i>Y18</i>	<i>Y19</i>	<i>Y20</i>	<i>Y21</i>	<i>Y22</i>	<i>Import.</i>	<i>Export.</i>	<i>Privado</i>	<i>Gobierno</i>	<i>Inversión</i>	<i>Total</i>
<i>Y1</i>	1	182	0	4	0	0	1 159	142	5 563	5 973	4 358	0	241	0
<i>Y2</i>	0	3	0	0	0	0	4	5	213	706	40	0	0	0
<i>Y3</i>	0	1	85	0	0	5	0	0	4 809	8	0	0	0	0
<i>Y4</i>	0	575	0	0	0	0	8	15	971	319	18	0	0	0
<i>Y5</i>	0	0	0	29	0	0	13 439	456	6 481	6 050	27 438	0	0	0
<i>Y6</i>	8	51	9	9	17	23	653	386	4 694	4 781	9 684	0	129	0
<i>Y7</i>	28	1 562	43	3	17	305	3 573	1 107	4 056	2 877	3 415	0	51	0
<i>Y8</i>	11	92	353	96	122	30	152	53	1 715	1 787	2 991	0	0	0
<i>Y9</i>	104	1 972	62	7	1	248	1 677	2 466	13 493	10 081	2 935	2 612	75	0
<i>Y10</i>	46	5 330	21	0	3	131	408	175	7 611	6 739	41	0	3 169	0
<i>Y11</i>	63	2 945	77	3	9	242	1 370	1832	19 000	11 811	3 744	69	21 143	0
<i>Y12</i>	22	9 275	701	117	57	248	3 083	941	16 584	25 791	10 236	23	12 995	0
<i>Y13</i>	199	218	261	4	5	174	1 583	771	130	23	4 287	0	0	0
<i>Y14</i>	1	1	3	1	1	3	34	19	855	0	413	0	0	0
<i>Y15</i>	2 457	14	8	0	0	10	469	210	0	0	1 096	0	0	0
<i>Y16</i>	82	100 059	152	8	14	108	8 408	1 353	1	11	8 186	0	80 889	0
<i>Y17</i>	10	1 438	21 818	16	53	882	2 567	489	189	2 001	5 394	206	267	0
<i>Y18</i>	8	17	19	1 583	1	17	103	32	21	926	139	14	15	0
<i>Y19</i>	4	96	5	0	3 320	350	619	180	998	1 863	646	95	0	0
<i>Y20</i>	50	546	1 160	417	923	20 395	5 092	1 314	1 502	1 934	5 752	71	0	0
<i>Y21</i>	247	8 794	2 988	101	417	2 049	219 791	6 429	7 128	11 010	145 537	4 117	21 593	0
<i>Y22</i>	20	165	39	0	6	235	790	91 005	109	126	13 888	74 680	0	0
<i>K</i>	617	11 181	7 909	78	469	8 494	87 231	12 501	0	0	181 910	0	0	0
<i>L</i>	764	50 667	5 348	571	930	4 992	68 851	44 308	0	0	234 272	0	0	0
Taxk	2	1 132	1 085	2	6	231	6 109	2 783	0	0	0	10 759	0	0
Taxl	174	3 802	1 490	117	269	1 618	12 409	13 038	0	0	0	44 445	0	0
Taxc	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	23 123	23 123	0	0
Taxls	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3 560	3 560	0	0
Ahorro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	140 567	0	140 567	0
Balance	0	0	0	0	0	0	0	0	96 123	94 817	1 306	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

FUENTE: Elaboración propia. INE, 2002.

CUADRO A2. Producción, consumo y emisiones en España

	Código tabla insumo-producto Simetrica 1995 (TIOS)	Producción (Millones de euros)	Porcen- taje	Consumo final (Millones de euros)	Porcen- taje	Emisiones CO2 (Millones de euros)	Porcen- taje	Resto emisiones (ktCO2-eq)	Porcen- taje	Emisiones totales (ktCO2-eq)	Porcen- taje	
1	Agricultura, ganadería y pesca	1, 2, 3	26 758	(3.8)	4 358	(1.7)	12 727	(5.5)	47 817	(51.4)	60 544	(18.6)
2	Extracción carbón	4	1 542	(0.2)	40	(0.0)	315	(0.1)	1 103	(1.2)	1 418	(0.4)
3	Extracción crudo y gas	5	130	(0.0)	0	(0.0)	165	(0.1)	15	(0.0)	180	(0.1)
4	Extracción otros minerales	6, 7	1 782	(0.3)	18	(0.0)	364	(0.2)	18	(0.0)	381	(0.1)
5	Industria alimentación	12, 13, 14, 15, 16	46 260	(6.5)	27 438	(11.0)	5602	(2.4)	416	(0.4)	6 018	(1.9)
6	Industria textil	17, 18, 19	12 554	(1.8)	9 684	(3.9)	1683	(0.7)	565	(0.6)	2 248	(0.7)
7	Industria madera y papel	20-22	13 858	(2.0)	3 415	(1.4)	3828	(1.6)	845	(0.9)	4 673	(1.4)
8	Industria refino petroleo	8	7 563	(1.1)	2 991	(1.2)	655	(0.3)	10 460	(11.2)	11 114	(3.4)
9	Industria química	23, 24	21 065	(3.0)	2 935	(1.2)	16 089	(6.9)	3 792	(4.1)	19 880	(6.1)
10	Industria metalica	29-30	22 913	(3.2)	41	(0.0)	19 104	(8.2)	4 353	(4.7)	23 457	(7.2)
11	Industria maquinaria	31-35	31 104	(4.4)	3 744	(1.5)	2 494	(1.1)	622	(0.7)	3 116	(1.0)
12	Otras industrias	25-28, 36-38	48 981	(6.9)	10 236	(4.1)	48 487	(20.9)	392	(0.4)	48 879	(15.0)
13	Electricidad	9	11 335	(1.6)	4 287	(1.7)	52 732	(22.7)	7 787	(8.4)	60 519	(18.6)
14	Gas natural	10	861	(0.1)	413	(0.2)	722	(0.3)	557	(0.6)	1 279	(0.4)
15	Distribución agua	11	2 457	(0.3)	1 096	(0.4)	378	(0.2)	111	(0.1)	488	(0.2)
16	Construcción	40	100 059	(14.1)	8 186	(3.3)	3 199	(1.4)	500	(0.5)	3 699	(1.1)
17	Transporte terrestre	45, 46	21 818	(3.1)	5 394	(2.2)	14 079	(6.1)	6	(0.0)	14 085	(4.3)
18	Transporte marítimo	47	1 583	(0.2)	139	(0.1)	716	(0.3)	85	(0.1)	801	(0.2)
19	Transporte aéreo	48	3 320	(0.5)	646	(0.3)	4 019	(1.7)	73	(0.1)	4 092	(1.3)
20	Anexos del transporte	49, 50	20 395	(2.9)	5 752	(2.3)	1 035	(0.4)	61	(0.1)	1 096	(0.3)
21	Servicios comerciales	41-44, 51-56, 58, 62-63, 68-71	219 791	(31.1)	145 537	(58.2)	5 780	(2.5)	1 758	(1.9)	7 538	(2.3)
22	Servicios no comerciales	39, 57, 59-61, 64-67	91 005	(12.9)	13 888	(5.5)	2 334	(1.0)	7 462	(8.0)	9 796	(3.0)
—	Hogares	—	—	—	—	—	35 678	(15.4)	4 254	(4.6)	39 932	(12.3)
	Total		707 134	(100)	250 238	(100)	232 181	(100)	93 053	(100)	325 234	(100)

FUENTE: Elaboración propia. INE, 2002.

CUADRO A3. Elasticidades de sustitución, producción, utilidad y comercio internacional

<i>Y</i>	Elasticidad de sustitución entre insumos materiales y energía-capital-trabajo	0
<i>KEL</i>	Elasticidad de sustitución entre energía y capital-trabajo	0.5
<i>KL</i>	Elasticidad de sustitución entre capital-trabajo	1
<i>E</i>	Elasticidad de sustitución entre electricidad y combustibles fósiles	0.5
<i>E1</i>	Elasticidad de sustitución entre carbón, petróleo y gas natural	1
<i>A</i>	Elasticidad de sustitución entre bienes internos e importados	3
<i>T</i>	Elasticidad de transformación entre bienes internos y exportaciones	2
<i>U</i>	Elasticidad de sustitución entre utilidad intertemporal	0.5
<i>C</i>	Elasticidad de sustitución entre consumo de bienes energéticos y no energéticos	0.5
<i>F</i>	Elasticidad de sustitución en el consumo entre bienes energéticos	1
<i>G</i>	Elasticidad de sustitución en el consumo entre bienes no energéticos	1
<i>B</i>	Elasticidad de sustitución entre producción y emisiones de proceso	0.08

FUENTE: MIT-EPPA (Babiker *et al.*, 2001).

CUADRO A4. Coeficientes estándares de CO₂ y uso de combustibles fósiles para combustión

	Carbón	Petróleo	Gas
Toneladas CO ₂ /Ktep	4 104	2 851	2 187
Industria química (porcentaje)	69	65	38
Industria (en general) (porcentaje)	—	75	—

FUENTE: Eurostat (2005).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Armington, P. (1969), “A Theory of Demand for Products Distinguished by Place of Production”, IMF Staff Papers, 16, pp.158-178.
- Babiker, M. H., M. Mayer, I. S. Wieng y R. C. Hyman (2001), “The MIT Emissions Prediction and Policy Analysis (EPPA) Model”, MIT Global Change Joint Program, 71, Cambridge.
- Barro, R. J., y X. Sala-i-Martin (1995), *Economic Growth*, Nueva York, McGraw-Hill.
- Blanchard, O. J., y S. Fischer (1989), *Lectures on macroeconomics*, Cambridge, MIT Press.

- Bohringer, C. (1998), "The Synthesis of Bottom-up and Top-down in Energy Policy Modelling", *Energy Economics*, 20, pp. 233-248.
- Boyd, y M. E. Ibarrarán (2002), "Costs of Compliance with the Kyoto Protocol: A Developing County Perspective", *Energy Economics* 24, pp. 21-39.
- Bye, B. (2000), "Environmental Tax Reform and Producer Foresight: An Inter-temporal Computable General Equilibrium Analysis", *Journal of Policy Modeling*, vol. 22, núm. 6, pp. 719-752.
- Capros, P., S. Proost, K. Conrad, S. Kotsomiti y G. Atsaves (1998), *The GEM-E3 Model: Reference Manual*, Bruselas, Report to European Commission.
- Chesnay, P., y J. P. Weyant (2006), "Multi-Greenhouse Gas Mitigation and Climate Policy", *The Energy Journal*, número especial.
- Cooper, A., S. Livermore y D. Rossi (2005), "The Economic Implications of Reducing Carbon Gas Emissions: A Cross-Country Quantitative Investigation Using the Oxford Model", *Energy Journal*, número especial, The Cost of Kyoto Protocol: A Multi-Model Evaluation, pp. 367-390.
- Criqui, P. (2001), *POLES: Prospective Outlook on Long-term Energy Systems*, Unité mixte de recherche du Centre National de la Recherche Scientifique, UFR DGES, Francia.
- Dellink, R. B. (2005), *Modelling the Costs of Environmental Policy: A Dynamic Applied General Equilibrium Assessment*, Cheltenham, Edward Elgar Publishing.
- , M. Hofkes, E. van Ierland y H. Verbruggen (2004), "Dynamic Modelling of Pollution Abatement in a CGE Framework", *Economic Modelling*, 21 (6), páginas 965-989.
- Dirkse, S. P., y M. C. Ferris (1995), "The PATH Solver: A Non-Monotone Stabilization Scheme for Mixed Complementarity Problems", *Optimization Methods and Software*, 5, pp. 123-156.
- Ellerman, A., y A. Deceaux (1998), "Analysis of Post-Kyoto CO₂ Emissions Trading Using Marginal Abatement Curve's", Joint Program on the Science and Policy of Global Change, MIT, Cambridge.
- Eurostat (2005), *Energy and Environment Statistics*, Luxemburgo, European Statistical Office.
- Fujita, M., P. Krugman y A. Venables (1999), *The Spatial Economy: Cities, Regions, and International Trade*, Cambridge, MIT Press.
- Ginsburgh, V., y M. A. Keyzer (1997), *The Structure of Applied General Equilibrium Models*, Cambridge, MIT Press.
- Hahn, R. W. (2000), "The Impact of Economics on Environmental Policy", *Journal of Environmental Economics and Management*, 39, pp. 375-399.
- Holtsmark, B., y O. Maestad, (2002), "Emission Trading under the Kyoto Protocol Effects on Fossil Fuel Markets under Alternative Regimes", *Energy Policy*, 30 (3), pp. 207-218.

- Hyman, R. C., J. M. Reilly, M. H. Babiker, A. De Másin y H. D Jacoby (2003), “Modeling non-CO₂ Greenhouse Gas Abatement”, *Environmental Modeling and Assessment*, 8, pp. 175-186.
- INE (2002a), *Contabilidad Nacional de España. Base 1995. Serie Contable 1995-2000. Marco Input-Output 1995-1996-1997*, Madrid, Instituto Nacional de Estadística.
- (2002b), *Estadísticas de medio ambiente*, Madrid, Cuentas Ambientales, Instituto Nacional de Estadística.
- IPPC (2007), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Fourth Assessment Report*, París, Intergovernmental Panel of Climate Change.
- Korosawa, A., H. Yaguita, W. Zhou y K. Tokimatsu (1999), “Analysis of Carbon Emission Stabilization Targets and Adaptation by Integrated Assessment Model”, *Energy Journal*, número especial, The Cost of the Kyoto Protocol: A Multi Model Evaluation, pp. 157-175.
- Krutilla, K. (1999), “Environmental Policy and Transactions Cost”, Van den Bergh (comp.), *Handbook of Environmental and Resource Economics*, Cheltenham, Edward Elgar.
- Lau, M. I., A. Pahlke y T. F. Rutherford (2002), “Approximating Infinite-Horizon Models in a Complementarity Format: A Primer in Dynamic General Equilibrium Analysis”, *Journal of Economic Dynamics and Control*, 26, pp. 577-609.
- Löschel, A. (2002), “Technological Change in Economic Models of Environmental Policy: A Survey”, *Ecological Economics*, 43(2), pp. 105-126.
- McCann, L., B. Colby, K. Easter y A. Kasterine (2005), “Transaction Cost Measurement for Evaluating Environmental Policies”, *Ecological Economics*, 52(4), pp. 527-542.
- Michaelowa, A., y F. Jotzo (2005), “Transaction Costs, Institutional Rigidities and the Size of the Clean Development Mechanism”, *Energy Policy*, 33 (4), páginas 511-523.
- Nordhaus, W. D. (1993), “Rolling the DICE: An Optimal Transition Path for Controlling Greenhouse Gases”, *Resource and Energy Economics*, 15(1), páginas 27-50.
- , y Z. Yang (1996), “RICE: A Regional Dynamic General Equilibrium Model of Optimal Climate-Change Policy”, *The American Economic Review*, 86(4), pp. 741-765.
- Persson, A., y M. Munasinghe. (1995), “Natural Resource Management and Economy Wide Policies in Costa Rica: A Computable General Equilibrium (CGE) Modelling Approach”, *World Bank Economic Review*, vol. 9 núm.2, páginas 259-285.
- ONU (1979), *Protocolo de Kyoto de la Convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático*, Naciones Unidas.

- PNA (2006), *Plan nacional de asignación de derechos de emisión 2005-2007 y 2008-12* (RD 1886/2004 y RD1360/2006 BOE 216), Madrid, Ministerio del Medio Ambiente.
- Reilly, J., y M. Mayer y J. Harnisch (2002), “Multiple Gas Control Under the Kyoto Agreement”, *Environmental Modeling and Assessment*, 7, pp. 217-229.
- Seebregts, A. J., G. Goldstein y K. Smekens (2001), “Energy/Environmental Modelling Using the MARKAL Family of Models”, *Operations Research Proceeding*, pp. 75-83.
- Shoven, J., y J. Whalley (1992), *Applying General Equilibrium*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Stern, N. (2006), *The Stern Review: the Economics of Climate Change*, HM Treasury, UK Government.
- Weayant, P. (1999), “The Costs of the Kyoto Protocol: a Multi-Model Evaluation”, John P. Weyant (comp.), *The Energy Journal*, número especial.