



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**ESCUELA SUPERIOR DE ECONOMÍA
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E
INVESTIGACIÓN**

UN MODELO DE ANÁLISIS INTEGRADO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRA EN CIENCIAS ECONÓMICAS

P R E S E N T A

IXCHEL GARAY RAMÍREZ



MÉXICO, D.F.

JUNIO DE 2014



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México D.F., siendo las 13:00 horas del día 16 del mes de mayo del año 2014 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de la SEPI ESE-IPN para examinar la tesis titulada:
Un modelo de análisis integrado.

Presentada por la alumna:

Garay	Ramírez	Ixchel							
Apellido paterno	Apellido materno	Nombre(s)							
Con registro:			A	1	2	0	0	5	1

aspirante de:

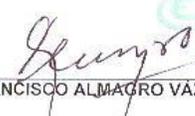
Maestría en Ciencias Económicas

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

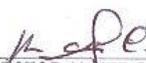
LA COMISIÓN REVISORA

Directores de tesis

 _____ DR. JOSÉ DE JESUÚS MEDEL JUÁREZ	 _____ M. EN C. JOSÉ RAMOS POUTOU
---	---

 _____ DR. FRANCISCO ALMACRO VÁZQUEZ	 _____ DRA. ALICIA BAZARTE MARTINEZ
---	---





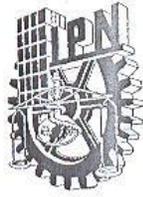
M. EN C. HÉCTOR ALBIER CAPUZANO

S.E.P.
INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
E.S.E.
SECCION DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACION

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES



DR. ADRIÁN HERNÁNDEZ DEL VALLE



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En México D.F., siendo las 13:00 horas el día viernes 16 del mes mayo del año 2014, el (la) que suscribe Ixchel Garay Ramírez alumno (a) del Programa de Maestría en Ciencias Económicas con número de registro A120051, adscrito a la SEPI ESE-IPN, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del Dr. José de Jesús Medel Juárez y del M. en C. José Ramos Poutou y cede los derechos del trabajo intitulado UN MODELO DE ANÁLISIS INTEGRADO, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección Azacapozalco Mz. 241 Lt. 56. Colonia Ciudad Azteca 2ª. Sección Ecatepec, Edomex. (C.P. 55120) Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

M. EN C. © IXCHEL GARAY RAMÍREZ

DEDICATORIAS

Les dedico esta tesis con cariño a mis padres.

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco a mi esposo por ser un confiable colega que siempre me comparte sus conocimientos.

Ixchel

ÍNDICE

ÍNDICE	i
ÍNDICE DE CUADROS	iii
ÍNDICE DE GRÁFICAS	iv
RESUMEN.....	vi
<i>ABSTRACT</i>	vii
INTRODUCCIÓN	viii
CAPÍTULO 1. IMPORTANCIA DE LAS POLÍTICAS AMBIENTALES PARA LA REDUCCIÓN DE CARBONO ATMOSFÉRICO EN LA ECONOMÍA.....	1
1.1 Medio ambiente y recursos naturales	2
1.2 Importancia de las políticas ambientales en la economía	3
1.2.1 La economía ambiental y otras escuelas vinculadas	3
1.2.2 El desarrollo sustentable.....	4
1.2.3 Tipos de valor de los recursos naturales.....	5
1.2.4 Los recursos naturales en algunos tipos de análisis económico	5
1.2.5 Métodos y técnicas de valoración económica de recursos naturales.....	6
1.2.6 Los sistemas de cuentas ecológicas y el producto interno bruto ecológico.....	9
1.2.7 Modelos económicos aplicables en el análisis de políticas ambientales	10
1.3 Políticas ambientales para la reducción del carbono atmosférico en la economía.....	11
1.3.1 Ciclo del carbono, gases efecto invernadero y cambio climático	11
1.3.2 Modelos de análisis integrado o modelos económicos y climáticos	13
CAPÍTULO 2. UN MODELO DE ANÁLISIS INTEGRADO	15
2.1 Estructura general de un modelo de análisis integrado	15
2.1.1 Elementos	15
2.1.2 Función de utilidad de aversión relativa al riesgo constante	17
2.2 Modelo Dinámico Integrado de Clima y Economía 2013	19

2.2.1 Función de bienestar social	19
2.2.2 Función de producción ajustada por daño climático	21
2.2.3 Función de producción ajustada por daño climático y costo de abatimiento	24
2.2.4 Ecuaciones de las emisiones de carbono	26
2.2.5 Ecuaciones de las masas de carbono	28
2.2.6 Ecuaciones de fuerza radiactiva	30
2.2.7 Ecuaciones de temperatura	31
2.2.8 Ecuaciones presupuestales	33
2.3 Recapitulando	33
CAPÍTULO 3. OPTIMIZACIÓN DEL TOMADOR DE DECISIONES	35
3.1 Ocho políticas ambientales	35
3.2 Resultados	41
3.2.1 Producto bruto, producto ajustado por daño climático y costo de abatimiento, inversión, capital y consumo	41
3.2.2 Masas de carbono y temperatura	47
3.2.3 Bienestar social	53
CONCLUSIONES	57
APÉNDICES	59
Apéndice 1. Variables y parámetros del modelo <i>DICE-2013</i>	59
Apéndice 2. Valor de los parámetros del modelo <i>DICE-2013</i>	66
Apéndice 3. Cuadros adicionales	67
BIBLIOGRAFÍA	71

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1: Políticas comparadas.....	36
Cuadro 2: Promedios de producto bruto, producto ajustado por daño climático y costo de abatimiento, inversión, capital y consumo.....	41
Cuadro 3: Promedios de masas de carbono y temperaturas.....	47
Cuadro 4a: Aumentos porcentuales en un horizonte de 300 años.....	53
Cuadro 4b: Aumentos porcentuales en un horizonte de 300 años.....	53
Cuadro 5: Bienestar social.....	53
Cuadro A1: $Y_{bruta}(t)$	67
Cuadro A2: $Q(t)$	67
Cuadro A3: $I(t)$	67
Cuadro A4: $K(t)$	68
Cuadro A5: $C(t)$	68
Cuadro A6: $M_{ATM}(t)$	68
Cuadro A7: $M_{UP}(t)$	69
Cuadro A8: $M_{LO}(t)$	69
Cuadro A9: $T_{ATM}(t)$	69
Cuadro A10: $T_{LO}(t)$	70

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1a: Política 1.....	37
Gráfica 1b: Política 2.....	37
Gráfica 1c: Política 3.....	38
Gráfica 1d: Política 4.....	38
Gráfica 1e: Política 5.....	39
Gráfica 1f: Política 6.....	39
Gráfica 1g: Política 7.....	40
Gráfica 1h: Política 8.....	40
Gráfica 2a: $Y_{bruta}(t)$ (billones de dólares americanos de 2005 / año).....	42
Gráfica 2b: $Y_{bruta}(t)$ (billones de dólares americanos de 2005 / año)	42
Gráfica 3a: $Q(t)$ (billones de dólares americanos de 2005 / año)	43
Gráfica 3b: $Q(t)$ (billones de dólares americanos de 2005 / año)	43
Gráfica 4a: $I(t)$ (billones de dólares americanos de 2005 / año)	44
Gráfica 4b: $I(t)$ (billones de dólares americanos de 2005 / año)	44
Gráfica 5a: $K(t)$ (billones de dólares americanos de 2005)	45
Gráfica 5b: $K(t)$ (billones de dólares americanos de 2005)	45
Gráfica 6a: $C(t)$ (billones de dólares americanos de 2005 / año)	46

Gráfica 6b: $C(t)$ (billones de dólares americanos de 2005 / año)	46
Gráfica 7a: $M_{ATM}(t)$ (Gigatoneladas de carbono)	48
Gráfica 7b: $M_{ATM}(t)$ (Gigatoneladas de carbono)	48
Gráfica 8a: $M_{UP}(t)$ (Gigatoneladas de carbono)	49
Gráfica 8b: $M_{UP}(t)$ (Gigatoneladas de carbono)	49
Gráfica 9a: $M_{LO}(t)$ (Gigatoneladas de carbono)	50
Gráfica 9b: $M_{LO}(t)$ (Gigatoneladas de carbono)	50
Gráfica 10a: $T_{ATM}(t)$ (Grados centígrados)	51
Gráfica 10b: $T_{ATM}(t)$ (Grados centígrados)	51
Gráfica 11a: $T_{LO}(t)$ (Grados centígrados)	52
Gráfica 11b: $T_{LO}(t)$ (Grados centígrados)	52
Gráfica 12: Bienestar social (unidades de utilidad).....	54
Gráfica 13: Tasa de abatimiento y bienestar social.....	54
Gráfica 14: Tasa de ahorro y bienestar social.....	55

RESUMEN

Los temas de la degradación ambiental son objeto de estudio para la ciencia económica. La relevancia de estos temas ha adquirido fuerza, debido a la agudización del problema. Un problema particular es la emisión de gases efecto invernadero, especialmente carbono atmosférico. Desde hace más de dos décadas surgieron los modelos de análisis integrado. Los modelos de análisis integrado contienen ecuaciones económicas y ecuaciones ambientales que se relacionan. Los modelos de análisis integrado sirven para evaluar políticas ambientales de reducción de emisiones de gases efecto invernadero de origen antropogénico. Una política ambiental particular consiste en una combinación sugerida por el planificador social, de los niveles de tasa de abatimiento de las emisiones de carbono y posiblemente algunas otras variables de decisión. Evaluar la política significa asignar un nivel de utilidad específico a cada combinación particular de valores adquiridos por las variables de decisión.

Entre los modelos de análisis integrado se encuentra el Modelo Dinámico Integrado de Clima y Economía, *DICE-2013* de Nordhaus y Sztorc. El modelo *DICE-2013* simula la trayectoria de una economía con tecnología Cobb-Douglas y evalúa el bienestar social aplicando una función de aversión relativa al riesgo constante. Las variables de decisión son la tasa de reducción global de emisiones de carbono atmosférico y la tasa de ahorro bruto mundial. Sus ecuaciones ambientales retratan el hecho de que las masas de carbono atmosférico aumentan conforme los niveles de producción son mayores. El aumento en las masas de carbono conduce a mayores niveles globales de temperatura. El aumento en la temperatura hace que el bienestar se reduzca. Por otra parte, el costo de abatimiento de las emisiones aumenta conforme la tasa de abatimiento de las emisiones es mayor.

La hipótesis de esta tesis es: “Si se utiliza el modelo Dinámico Integrado de Clima y Economía, *DICE-2013*, de Nordhaus y Sztorc (2013), para evaluar cada una de las políticas ambientales para la reducción de emisiones de gases efecto invernadero, en concreto, carbono atmosférico, de entre un grupo de políticas disponibles, se logra identificar, de entre todas ellas, cuál es la alternativa más conveniente desde el punto de vista económico actual, que toma en cuenta la importancia del medio ambiente.” La hipótesis se pone a prueba a través de la comparación de un grupo de ocho políticas ambientales para la reducción del carbono atmosférico distintas, evaluadas con el modelo *DICE-2013*.

ABSTRACT

The issues of environmental degradation are studied for economics. The relevance of these themes has gained strength due to the worsening of the problem. A particular problem is the emission of greenhouse gases, especially atmospheric carbon. For over two decades emerged integrated assessment models. Integrated assessment models contain environmental and economic equations that relate equations. Integrated assessment models are used to evaluate environmental policies to reduce emissions of greenhouse gases of anthropogenic origin. A particular environmental policy is a combination suggested by the social planner, of the rate of carbon emission reduction and possibly some other decision variables. Evaluate the policy means assigning a specific level of utility to each particular combination of values acquired by the decision variables.

Among the integrated assessment models is the Dynamic Integrated Climate Economy model, DICE-2013 from Nordhaus and Sztorc. The DICE-2013 model simulates the trajectory of an Cobb-Douglas technology economy and evaluates the social welfare function by applying a constant relative risk aversion. The decision variables are the global rate of carbon emission reduction and world gross saving rate. Their environmental equations portray the fact that the masses of atmospheric carbon increase as production levels are higher. The increase in carbon mass leads to higher overall levels of temperature. The increase in temperature causes the well is reduced. Moreover, the cost of emissions abatement increases as the rate of depletion of emissions is greater.

The hypothesis of this thesis is: “If the Dynamic Integrated Climate Economy model from Nordhaus and Sztorc (2013), DICE-2013, is used to evaluate each of the environmental policies for reducing greenhouse gas emissions, specifically, atmospheric carbón, from a pool of policies available, it can identify among them, which is the most convenient alternative from the nowadays economic point of view, which takes into account the importance of the environment.” Hypothesis is tested by comparing a group of eight different environmental policies for reducing atmospheric carbon, evaluated with the DICE-2013 model.

INTRODUCCIÓN

La ciencia económica está involucrada tanto académica como prácticamente en temas ambientales. El análisis de políticas ambientales, en particular, las políticas relacionadas con la reducción de gases efecto invernadero, en específico carbono atmosférico, son un área de investigación económica desde hace más de dos décadas. En concreto, esta labor se manifiesta a través de los modelos multidisciplinarios llamados modelos de análisis integrado.

Los modelos de análisis integrado son modelos especialmente diseñados para analizar políticas ambientales de reducción de gases efecto invernadero. Se tiene una función de utilidad sujeta a restricciones ambientales. El tomador de decisiones o planificador social pretende elegir la combinación óptima de nivel de abatimiento de emisiones e inversión.

Un caso clásico y muy famoso de modelos de análisis integrado es el de los modelos *DICE* de Nordhaus¹ (1977, 1991, 1994, 1999, 2004, 2013). Esta palabra contiene las siglas de su nombre originalmente en inglés: *Dynamic Integrated Climate Economy model*. Lo anterior se traduce aquí como Modelo Dinámico Integrado de Clima y Economía.

Los modelos *DICE* analizan a nivel mundial y no distinguen sectores ni categorías económicas o no económicas. Se basan en un análisis costo-beneficio para calcular el saldo óptimo entre la reducción de gases efecto invernadero y los daños económicos provocados por el cambio climático, con objeto de maximizar el bienestar intertemporal. Esto es, tanto el calentamiento global provocado por las emisiones de gases efecto invernadero como los esfuerzos por reducir tales emisiones tienen un costo económico para la sociedad. Incluyen una función de producción de elasticidad constante que determina el producto mundial bruto y cuyas entradas son el capital y el trabajo, y una tasa de crecimiento tecnológico exógena. Tienen ecuaciones que representan cómo la emisión de gases efecto invernadero provoca el calentamiento global y una función de reducción de las emisiones.

El objetivo de esta tesis es poner a prueba la hipótesis siguiente: “Si se utiliza el modelo Dinámico Integrado de Clima y Economía, *DICE*-2013, de Nordhaus y Sztorc (2013), para evaluar cada una de las políticas ambientales para la reducción de emisiones de gases efecto invernadero, en concreto, carbono atmosférico, de entre un grupo de políticas disponibles, se logra identificar, de entre todas ellas, cuál es la alternativa más conveniente desde el punto de vista económico actual, que toma en cuenta la importancia

¹ Varias de estas versiones tienen coautores.

del medio ambiente.” El modelo será considerado eficaz si es capaz de decir en términos cuantitativos y congruentes con el marco teórico expuesto en el capítulo 1, de un conjunto de políticas ambientales propuestas, cuál de todas ellas es la mejor.

El capítulo 1 se elabora una exposición panorámica de los aspectos específicos en los que la ciencia económica está involucrada, para justificar la importancia que aquí se alude, de las políticas ambientales para la reducción de carbono atmosférico en la economía. A la vez, se incluye una reseña de algunos de los modelos más famosos que existen para analizar tales políticas. Señalar la relevancia de las políticas ambientales para la reducción de carbono atmosférico en la economía y de los modelos de evaluación integrada constituye una aportación de este trabajo.

En el capítulo 2 se expone la estructura general de los modelos de análisis integrado. Después se muestra la estructura específica del modelo *DICE-2013* de Nordhaus y Sztorc (2013) que, como ya se dijo, es un caso específico de los modelos de análisis integrado y es el que se aplica en esta tesis. La explicación de este modelo para ayudar a comprenderlo constituye otra aportación de esta tesis.

En el capítulo 3 se aplicará el modelo *DICE-2013* para encontrar una política ambiental de reducción de carbono atmosférico óptima. En específico, dicha búsqueda se traducirá en la formulación y evaluación de ocho políticas ambientales distintas. Como se dijo, se considerará que el modelo es eficaz si ofrece resultados coherentes y lógicos y constituye una base de comparación numérica entre dos o más políticas desde el punto de vista económico según el marco teórico aquí tratado.

Las variables involucradas en esta investigación son todas las variables y parámetros del modelo *DICE-2013*, cuya lista completa puede verse en el apéndice 1. En concordancia con tales variables, el marco geográfico es mundial.

Se usará la parametrización ofrecida por Nordhaus y Sztorc (2013), para hacer proyecciones quinquenales desde el año 2015 hasta el año 2310, de todas las variables del modelo *DICE-2013*. Además se incluye el valor de las variables del año 2010 que el modelo ofrece. De tal forma, el marco cronológico va del año 2010 al 2310.

El marco teórico se desarrolla detalladamente en el capítulo 1; sin embargo, desde ahora se puntualiza que tal marco es ni más ni menos que el económico, aunque desde el punto de vista actual porque, sin importar la escuela económica de la que se trate, hoy en día la problemática de la degradación ambiental también es un tema económico. Por otra parte, como detalle técnico cabe mencionar que los modelos de análisis integrado, como el que aquí se trata, corresponden con la escuela neoclásica, dado que incluyen una función de utilidad y es sabido que las funciones de utilidad son un concepto neoclásico.

CAPÍTULO 1. IMPORTANCIA DE LAS POLÍTICAS AMBIENTALES PARA LA REDUCCIÓN DE CARBONO ATMOSFÉRICO EN LA ECONOMÍA

Este capítulo ilustra la importancia del análisis de políticas ambientales en la economía, en particular, las políticas relacionadas con la reducción de carbono atmosférico. Esto se logra partiendo de una exposición panorámica de los aspectos específicos en los que esta ciencia está involucrada tanto académica como prácticamente en temas ambientales.

En concreto, primero se definen algunos conceptos que se emplearán a lo largo de esta tesis. Luego se cita la existencia de escuelas económicas especialmente enfocadas en las intersecciones de economía-ecología: la economía ambiental, la economía ecológica y los ambientalistas marxistas. Se menciona lo que es el desarrollo sustentable, que además de las esferas económica y ecológica se interseca con la social. Se refieren algunos tipos de valor de los recursos naturales considerados por las escuelas clásica y neoclásica, entre otras. Se señala el importante papel de los recursos naturales en algunos tipos de análisis económico, muy comunes en la práctica, independientemente de la escuela económica en la que estén inspirados. Después se exponen varios métodos y algunas técnicas, frecuentemente empleados para valorar recursos ambientales, la mayoría basados en el concepto neoclásico de propensión a pagar, aunque también se cita una técnica de naturaleza keynesiana. Se indica lo que son las cuentas satélite ecológicas y el producto interno bruto ecológico. Se mencionan modelos económicos aplicables en el análisis de políticas ambientales y se deja ver que entre las principales aplicaciones que se les ha dado está el análisis de políticas ambientales para la reducción de gases efecto invernadero.

En la última parte del capítulo se expone lo que es el ciclo del carbono, gases efecto invernadero y el calentamiento global o cambio climático, para dar razón de que los modelos para reducir emisiones de dióxido de carbono ocupan un lugar central en las políticas ambientales de reducción de emisiones de gases efecto invernadero. Después se explica que los modelos de análisis integrado son modelos económicos especialmente diseñados para analizar políticas ambientales de reducción de carbono atmosférico y se reseñan algunos de los tipos más famosos.

1.1 Medio ambiente y recursos naturales

Medio ambiente es el conjunto de factores físicos, naturales, sociales, económicos, culturales y estéticos que rodean a un ser vivo. No sólo es el espacio donde se desarrolla la vida, sino que también comprende seres vivos. Los recursos naturales son los bienes y servicios ambientales que proporciona la naturaleza sin alteración por parte del ser humano y que son utilizados por las sociedades humanas para lograr su bienestar y desarrollo.

Los bienes ambientales son materias primas que utiliza el hombre en sus actividades económicas. Se dividen en recursos naturales renovables y no renovables. Los recursos naturales renovables son los que se regeneran o reproducen con cierta rapidez: Aire, agua, plantas, árboles, peces y demás animales, entre otros. Los recursos naturales no renovables son aquellos cuya velocidad de regeneración es prácticamente nula para la percepción humana: minerales, carbón, gas, petróleo y capa de ozono, entre otros.

Un ecosistema es una comunidad biológica cuyos procesos vitales se relacionan entre sí, así como con los factores físicos y químicos del ambiente abiótico que comparten. Los servicios ambientales son funciones ecosistémicas que son utilizadas por el hombre en sus actividades económicas: Belleza escénica, fuente de formas de energía, producción de oxígeno, captación hídrica, control biológico, diversidad genética o banco de genes, fijación de carbono, formación de suelos, materia prima, oferta de agua, polinización, producción de alimentos, protección de suelos, reciclado de nutrientes, refugio de especies, regulación de clima, regulación de gases, retención de sedimentos y control de la erosión, tratamiento de residuos, generación de un medio para actividades recreativas, culturales y de investigación (Barzev, 2002).

De acuerdo con las definiciones anteriores, que son las que se emplearán en esta investigación, los recursos naturales representan una parte del medio ambiente. Cabe mencionar que en la literatura de temas que involucran economía¹ y ecología² a veces se usa el término medio ambiente para referirse a los servicios ambientales y el término recursos naturales para referirse a los bienes ambientales. También ocurre que se usan los términos bienes naturales, recursos ambientales o medio ambiente como sinónimos de recursos naturales.

Por degradación ambiental se entenderá el conjunto de procesos socioeconómicos que deterioran o impiden la utilización de un determinado recurso natural. La contaminación ambiental es la causa más común de la degradación ambiental pero no es la única. Contaminación ambiental es la alteración nociva del estado natural del medio ambiente como consecuencia de la introducción de un contaminante. Se entenderá por política de gestión ambiental o política ambiental aquélla que pretende evitar el agotamiento y degradación de los bienes y servicios ambientales y algunas formas de

¹ Ciencia que estudia los métodos más eficaces para satisfacer las necesidades humanas materiales, mediante el empleo de bienes escasos.

² Ciencia que estudia las relaciones de los seres vivos entre sí y con su entorno.

contaminación del medio ambiente menos relacionadas con los recursos naturales, como la contaminación sonora y la visual.

1.2 Importancia de las políticas ambientales en la economía

Para ilustrar la importancia del análisis de políticas ambientales en la economía, aquí se hace una exposición panorámica de los aspectos específicos en los que la economía está involucrada tanto académica como prácticamente, en temas ambientales.

1.2.1 La economía ambiental y otras escuelas vinculadas

Economía ambiental es la interpretación de la escuela neoclásica al incorporar los recursos naturales como objeto de estudio. Se dice que los recursos naturales han adquirido una característica de bienes económicos porque los bienes escasos son bienes económicos y muchos bienes y servicios ambientales han comenzado a escasear en cantidad y calidad (Chang, 2005).

Por otra parte, si los recursos naturales adquieren precio en función de sus costos de extracción y distribución, pero no respecto su costo de producción, los bienes y servicios ambientales no pueden gestionarse a pesar de ser recursos escasos (Chang, 2005). Adquieren una característica de bienes no económicos. La economía ambiental se ocupa principalmente de la valoración monetaria de los recursos naturales. Si los recursos naturales adquieren precio respecto su costo de producción y derecho de propiedad se vuelven bienes económicos.

La economía ambiental cuantifica, en términos monetarios, los flujos de insumos y servicios provenientes de los ecosistemas y el impacto de las actividades económicas humanas sobre ellos (Barzev, 2002). Se conformó en la década de 1970, basándose en las teorías de internalización de las externalidades³ de los economistas neoclásicos Arthur Cecil Pigou⁴ y Ronald Coase⁵. Existen otras escuelas económicas que estudian los recursos naturales como bienes económicos. La economía ecológica se enfoca en la biósfera⁶, pues analiza los ciclos biogeoquímicos de sus ecosistemas y las leyes de la termodinámica para enfatizar que los recursos naturales son finitos. Los ambientalistas marxistas por su parte, le dan mayor peso al aspecto social (Chang, 2005).

Según los adeptos a la teoría de Pigou la contaminación ambiental es una externalidad negativa que debe incorporarse al mercado a través de cobrar impuestos a los agentes económicos que la ocasionan y se recomienda la intervención del Estado. Coase,

³ Externalidad es una situación provocada involuntariamente por un individuo y que afecta a otro. Las externalidades positivas benefician al otro y las negativas lo perjudican. Las externalidades no son reflejadas en el precio de los bienes o servicios.

⁴ En 1920 aportó *The Economics of Welfare, La economía del bienestar*.

⁵ En 1960 aportó *The Problem of the Social Cost, El problema del costo social*.

⁶ Seres vivos del planeta Tierra o el medio donde se desarrollan.

muy adepto al liberalismo, sugería que todos paguen impuestos para combatir la contaminación ambiental, sin importar tanto quién la ocasionó. Garret Hardin⁷, de la corriente de Coase, sugería privatizar todos los recursos naturales para dar lugar a una ecología de mercado (Chang, 2005).

Las políticas de gestión ambiental congruentes con el modelo de Pigou resultan onerosas e ineficaces. Las políticas de gestión ambiental acordes con el modelo de Coase legitiman el derecho de contaminar. La principal causa del fracaso de estos modelos es la falta de información. Aparte, resulta muy difícil y subjetivo cuantificar monetariamente un costo social, o tratar de establecer un derecho de propiedad (Chang, 2005).

1.2.2 El desarrollo sustentable

Desde 1968 a la fecha se han llevado a cabo, con pocos años de separación entre sí, o con ninguno, conferencias y reuniones mundiales sobre el medio ambiente, dirigidas a la formulación de políticas de gestión ambiental.

En 1987 una comisión multinacional para la Organización de las Naciones Unidas elaboró el llamado informe Brundtland. En este documento apareció el concepto de desarrollo sustentable, sostenible o perdurable, que es el desarrollo económico que pretende satisfacer las necesidades de las generaciones presentes, sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer las suyas (United Nations (1987), citado en Almagro Vázquez (2010)).

El desarrollo sustentable busca el desarrollo que es favorable desde los puntos de vista tanto económico como ecológico y social. Algunas opiniones respecto el desarrollo sustentable van desde los que enfatizan que el crecimiento económico es compatible con la preservación de los recursos naturales mediante aumentar la productividad, esto es, producir más consumiendo menos recursos y contaminando menos, hasta los que se oponen al crecimiento económico por considerarlo inviable ecológicamente.

En el caso de México, los dos últimos sexenios de gobierno (2001-2006 y 2007-2012) han incluido políticas de desarrollo sustentable en su respectivo Plan Nacional de Desarrollo (Almagro Vázquez, 2010). El Plan Nacional de Desarrollo 2007-2012 de México, sugiere la “valoración económica de los bienes y servicios ambientales y su apreciación efectiva por parte de la sociedad, para fincar el proceso de conciliación de lo ambiental con el desarrollo social y económico...” (Presidencia de la República (2007), p. 251; citado en Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2012), p. iv). Sin embargo, la investigación presentada por Almagro Vázquez (2011) revela que desafortunadamente, en términos prácticos y objetivos, México no satisface los principios que rigen el desarrollo sustentable.

⁷ En 1968 aportó *The Tragedy of the Commons, La tragedia de los bienes públicos*.

1.2.3 Tipos de valor de los recursos naturales

Para los economistas clásicos el valor de un bien se mide por la cantidad de trabajo requerido para producirlo, bajo ciertas condiciones de producción. La economía neoclásica define el valor de un bien por su utilidad marginal. La utilidad es un concepto subjetivo y se asume que todos los individuos tienen preferencias de consumo idénticas. Los neoclásicos no hablan del valor de un bien desde el punto de vista de la producción sino más bien del precio o valor de un bien desde el punto de vista del mercado (Chang, 2005).

Los recursos naturales pueden tener *valor de uso* porque pueden ser utilizados. El *valor de uso es directo* es el que tiene un bien que tras ser consumido deja de estar disponible para otros (por ejemplo, el caso de un platillo de mariscos). El *valor de uso indirecto* es el que aporta un bien que puede consumirse y sigue estando disponible para otros (divertirse en una playa no evita que en el futuro otros puedan visitarla) (Barzev, 2002).

Para los economistas neoclásicos *valor de opción* de un recurso natural es la posibilidad de decidir entre usarlo ahora o después. Un recurso natural que es reservado para ser utilizado en el futuro tiene *valor de casi opción* o *de legado*. Este último se relaciona con la equidad intergeneracional. Los marxistas por su parte enfatizan la equidad entre las personas contemporáneas o equidad intrageneracional. Para los que se enfocan en lo biológico, el valor es para los seres vivos no humanos (Chang, 2005).

Los recursos naturales también pueden tener *valor de no uso*, *valor pasivo* o *valor de existencia*. Es un valor intrínseco a la naturaleza que no requiere ser consumido. Constituye un beneficio la satisfacción de preservarlo y saber que existe. Por ejemplo, el gusto de que haya venados y tortugas (Barzev, 2002).

1.2.4 Los recursos naturales en algunos tipos de análisis económico

El *análisis de impacto ambiental* deviene del modelo de Pigou (Chang, 2005). Consiste en identificar las repercusiones significativas que habrá en el medio ambiente como consecuencia de llevar a cabo un proyecto público o privado, industrial o civil, regional o local. Puede hacerse un análisis de impacto ambiental retrospectivo, para comparar los pronósticos previos con lo que realmente ocurrió. En Estados Unidos las entidades gubernamentales o privadas financiadas parcialmente y reguladas por el gobierno federal están obligadas a elaborar un análisis de impacto ambiental que incluye (Barzev, 2002):

- a) Descripción del impacto ambiental.
- b) Efectos ambientales adversos inevitables tras implementarse la propuesta.
- c) Alternativas a la acción propuesta.
- d) Relación entre usos de corto plazo y el mantenimiento y mejoramiento productivo de largo plazo.
- e) Efectos ambientales adversos irreversibles y recursos irrecuperables tras implementarse la propuesta.

El *análisis de impacto económico* consiste en analizar cómo una acción específica legal, comercial, tecnológica o de otro tipo, afectará total o parcialmente un sistema económico. Si el proyecto que se analiza es una política ambiental, en el estudio de impacto económico es de especial interés conocer el impacto de tal política en las tasas de crecimiento económico o en las tasas de desempleo de una población o un sector productivo específico.

En un *análisis de costo-efectividad* se tiene un objetivo inicial dado y se elige la alternativa menos costosa de lograrlo. O bien, dado un nivel de gastos específico se busca maximizar el beneficio. Puede emplearse el principio equimarginal⁸. Por ejemplo, buscar los menores costos marginales para un nivel dado de reducción de la contaminación. Cabe mencionar que esto último requeriría saber qué tanta reducción del contaminante es eficiente ante los daños causados por las emisiones del mismo.

En un *análisis de costo-beneficio* se cuantifican monetariamente los costes y beneficios que devienen directa o indirectamente de un proyecto y se sopesan. Puede utilizarse para seleccionar políticas ambientales adecuadas y evaluar proyectos para mejorar la calidad ambiental. Es la principal herramienta para la evaluación económica de obras públicas: Alcantarillado, potabilización del agua y explotación de pozos petrolíferos, entre otros.

1.2.5 Métodos y técnicas de valoración económica de recursos naturales

La siguiente clasificación se propone en Barzev (2002); los tres primeros puntos se complementan con Chang (2005).

El concepto neoclásico de propensión a pagar es la disposición de los consumidores a pagar por un bien o servicio dependiendo de la utilidad que les proporciona. La propensión a recibir es lo que los consumidores estarían dispuestos a recibir para no tenerlo. Varios de los métodos de valoración económica de recursos naturales que se explican en los puntos 1 al 3, se basan en la propensión a pagar para conservar⁹ un recurso natural o en la propensión a recibir para perderlo o sustituirlo (Barzev, 2002 y Chang, 2005).

⁸ Principio que dice que el consumidor maximizará su utilidad cuando la utilidad marginal de todos los bienes consumidos por unidad marginal de gasto sea idéntica.

⁹ Preservar o reducir al mínimo la intervención humana, mantener, utilizar de forma sostenida, restaurar y mejorar.

1. Métodos de valoración directa

a) Valores directos de mercado

- *Cambio de productividad.* Se compara la productividad¹⁰ obtenida antes y después de cierta degradación ambiental. La diferencia es el valor estimado del recurso natural que se perdió.
- *Pérdidas de ganancia o de capital humano por daños en la salud.* El valor del recurso natural echado a perder por degradación ambiental se estima por la reducción de la productividad del trabajo¹¹ que proviene de la pérdida de salarios y gastos médicos realizados por daños en la salud de los trabajadores provocados por esa degradación.
- *Método de precio líquido.* Se valora un recurso natural por su precio líquido de mercado, deducidos, por lo tanto, los costos de extracción. Muy utilizado para valuar áreas deforestadas.
- *Costo de oportunidad.* Los recursos naturales que no tienen un precio de mercado a veces se miden por el costo de oportunidad¹² de preservarlos.

b) Valores directos de gastos

- *Método de costo-efectividad.* Estima el costo de proteger un recurso natural como el costo de formas alternativas de hacer que tenga un nivel de calidad específico. Ejemplo: Agua o aire.
- *Método de costos preventivos.* Se estima el valor de un recurso natural a través de los gastos efectivos realizados para revertir o evitar la degradación ambiental que lo afecta o que podría afectarlo.

2. Métodos de valoración indirecta

- *Método de valores de la propiedad, método de precios hedónicos o método del precio implícito.* El beneficio de habitar un medio ambiente poco degradado se valora como la diferencia de precios que se pagan respectivamente por un inmueble en esta zona, respecto un inmueble semejante en un medio más degradado.
- *Diferencial de salarios.* Según la teoría de mercados competitivos la demanda de trabajo es igual al producto marginal del trabajo.¹³ En un medio ambiente muy degradado la demanda de trabajo es poca y los trabajadores requieren mayor salario. Este método no es muy adecuado para países en desarrollo dada la poca competitividad de los mercados.¹⁴

¹⁰ Nivel de producción entre recursos utilizados.

¹¹ Nivel de producción entre trabajo empleado.

¹² Mejor alternativa de inversión no disponible o valor de la mejor opción no realizada, en términos monetarios.

¹³ Productividad del trabajo.

¹⁴ Mercado competitivo es aquél en el que ningún agente puede fijar unilateralmente los precios ni la oferta o la demanda.

- *Costo del viaje.* Se calcula el valor de un sitio ecoturístico por los gastos en que incurren los visitantes y los salarios que dejan de percibir por estar en él o por trasladarse hacia o desde él.
- *Costo de reposición o método de costos de recuperación.* Se estima el valor de un recurso natural a través del costo estimado de reponerlo.
- *Costos de relocalización.* Los costos estimados necesarios para reubicar asentamientos humanos o un recurso natural, debido a degradación ambiental. Constituyen una cota superior de costo por degradación ambiental y es una medida indirecta del beneficio de evitarla.
- *Proyectos o precios sombra.* Costo de reponer o sustituir un servicio ambiental provocado por degradación ambiental, en vez de reponer los bienes ambientales relacionados.

3. Métodos de valoración contingente

- *Juegos de licitación.* Se hace una encuesta para averiguar la disposición a pagar de un individuo para preservar un recurso natural o con cuánto está dispuesto a ser compensado por perderlo. Las respuestas varían con cada individuo pero en general la propensión a recibir es mayor que la propensión a pagar. Se basa en los conceptos hicksianos de variación compensada¹⁵ y variación equivalente¹⁶.
- *Experimentos tómalo o déjalo.* Se basa en la teoría de las preferencias reveladas.¹⁷ Se les pregunta a las personas si están o no dispuestos a recibir una compensación a cambio de perder un recurso natural. O bien se puede preguntar si están dispuestos a pagar por preservarlo.
- *Juegos de intercambio.* El encuestado relaciona paquetes de recursos naturales con sumas de dinero con la finalidad de que el encuestador establezca niveles de utilidad.
- *Elección de menor costo.* Sin mencionar sumas de dinero, el encuestado ordena paquetes de recursos naturales desde las más preferidas a las menos preferidas con la finalidad de que el encuestador establezca niveles de utilidad. Se procede a preservar la alternativa de menor costo según las preferencias de los encuestados.
- *Técnica Delphi.* Se recurre a expertos para valorar los recursos ambientales.

4. Otros métodos

La técnica que se menciona a continuación no es microeconómica sino macroeconómica y es más keynesiana que neoclásica (Barzev, 2002).

¹⁵ Cuánto dinero le deben dar o quitar a un individuo para que tras degradarse o conservarse un recurso natural se encuentre en la misma curva de indiferencia.

¹⁶ Cuánto dinero le deben dar o quitar a un individuo para que cambie a la curva de indiferencia en la que estaría si un recurso natural se hubiese degradado o conservado.

¹⁷ Si una persona escoge una canasta A de bienes y no la B, la canasta A es preferible.

- *Método de los coeficientes integrales*. Utilizando una matriz de insumo-producto¹⁸, se calcula el cambio en una función objetivo de beneficio social neto, ante la disposición de una unidad adicional del recurso natural restringido. Esto es, optimiza la función objetivo¹⁹ y calcula el multiplicador de Lagrange o precio sombra.

1.2.6 Los sistemas de cuentas ecológicas y el producto interno bruto ecológico

Un sistema de cuentas nacionales tradicional no está diseñado para registrar costos por degradación y agotamiento de bienes y servicios ambientales. Actualmente existen diversos sistemas contables que incluyen cuentas satélite ecológicas capaces de registrarlo, ayudando a evitar que peligre la sustentabilidad del desarrollo económico. Destaca la *National Accounting Matrix including Environmental Accounts*, modelo empleado por la mayoría de los países miembros de la Unión Europea. (Almagro Vázquez, 2010).

El Sistema de Cuentas Nacionales de México de 1993 ya tenía cuentas satélite ecológicas. El Sistema de Cuentas Económicas y Ecológicas de México (SCEEM), desde entonces ha sido parte del Sistema de Cuentas Nacionales de México. Con base en el SCEEM es posible calcular el producto interno bruto ecológico o PIBE de México. El PIBE es el producto interno bruto tradicional menos los costos por agotamiento y degradación ambiental (Almagro Vázquez, 2010).

En México ahora se dispone del SCEEM 2006-2010, basado en el Sistema de Cuentas Nacionales de México de 1993, el Sistema de Cuentas Nacionales de México de 2008 y las recomendaciones establecidas en el Sistema de Contabilidad Ambiental y Económica Integrada 2003²⁰ publicado por ONU et. al. (2003) el cual “incluye las modificaciones más recientes, derivadas de una serie de discusiones teóricas implementadas en el seno del Grupo Londres para el medio ambiente, cuyo proceso de revisión inició desde el año de 1994” (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2012), p. iv).

Los métodos seguidos para asignar un valor monetario a los bienes y servicios ambientales según el SCEEM basado en el Sistema de Cuentas Nacionales de México de 1993 o según el SCEEM 2006-2010 son el método de la renta neta, método del costo por uso, precios de mercado sustitutos o método de precios sombra, método de costos de mantenimiento y método del precio neto (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2011 y 2012)). Son más o menos parecidos con algunos de los métodos expuestos en la sección anterior.

¹⁸ El análisis insumo-producto es un marco analítico desarrollado por el profesor Wassily Leontief a finales de 1930. Por ello le dieron el Premio Nobel en Ciencias Económicas en 1973.

¹⁹ Optimizar significa maximizar o minimizar, según se quiera.

²⁰ *System of Environmental and Economic Accounting 2003*

1.2.7 Modelos económicos aplicables en el análisis de políticas ambientales

Los modelos de insumo producto, los modelos de equilibrio parcial, los modelos macroeconómicos, los modelos de equilibrio general estáticos y los modelos de equilibrio general dinámicos (también llamados modelos econométricos de equilibrio general) que pueden o no ser estocásticos, son modelos económicos aplicables en el análisis de políticas ambientales. Por ejemplo, Miller (2009) menciona las aplicaciones que diversos autores han dado a las matrices insumo producto para resolver problemas ambientales. Por su parte, Wing (2011) explica cómo usar los modelos de equilibrio general computable en economía ambiental y de recursos.

Con base en Wing (2011) puede decirse que durante la primera década del siglo XXI abundaron las investigaciones que aplicaron modelos de equilibrio general computable en:

- a) Cuantificar cómo los cambios en el flujo circular de la economía debido a los procesos endógenos, cambios de políticas o perturbaciones exógenas afectan el nivel de la calidad ambiental; esto incluye:
 - i. Estimar costos económicos y ambientales en diversos países como resultado de la globalización y efectividad de las diferentes políticas para administrar tales costos;
 - ii. interacción entre externalidades ambientales y crecimiento económico, distribución del ingreso y mercados laborales;
 - iii. análisis de las prácticas de calidad y administración de recursos hidráulicos y
 - iv. análisis de la administración de recursos agrícolas y forestales: degradación del suelo y perturbaciones macroeconómicas por deforestación.

- b) Analizar las alteraciones en el flujo circular de la economía ocasionadas por modificar la localización de residuos de contaminantes o de recursos ambientales consumidos, como consecuencia de políticas que pretenden incrementar el nivel de la calidad ambiental; esto incluye:
 - i. Costos económicos del equilibrio general de políticas para combatir la contaminación del aire y del agua;
 - ii. costos económicos del cambio climático y efectos de crecimiento y bienestar de las medidas de abatimiento de gases efecto invernadero;
 - iii. costos económicos del cambio climático y consecuencias de la limitación de emisiones de gases efecto invernadero en los mercados de energía, como son los de la lista siguiente:
 - Efectos económicos de impuestos ambientales específicos, especialmente sus interacciones con las distorsiones de mercado preexistentes;
 - consecuencias económicas y ambientales a largo plazo de aumentos en investigación y desarrollo y productividad de los factores, progreso tecnológico en el ahorro de energía, surgimiento de tecnologías alternativas de energía más baratas y que abatan los gases efecto invernadero;

- relación entre el abatimiento de gases efecto invernadero, el sistema comercial mundial y la fuga de emisiones de los países con abatimiento hacia los países en desarrollo sin abatimiento;
- condiciones para el surgimiento de coaliciones endógenas de regiones de abatimiento en un ambiente de teoría de juegos;
- interacciones entre las medidas de reducción de emisiones tales como regímenes de permisos negociables e imperfecciones en los mercados de energía y
- los efectos distributivos de los sistemas para compartir la carga de la reducción de las emisiones de gases efecto invernadero, así como la asignación de cuotas en los sistemas de permisos negociables, a lo largo de países y regiones, empresas e industrias o bien entre grupos de ingresos dentro de las regiones.

Wing (2011) dice que la mayor parte de la literatura política se ubica en el inciso b, especialmente en el subinciso iii.

El problema que se pretende abordar en esta tesis cae en el inciso b, subinciso ii, de la lista anterior. Así pues, el análisis de políticas ambientales para la reducción de gases efecto invernadero es importante en la ciencia económica. En lo que sigue de este capítulo se verá que el análisis de políticas ambientales para la reducción de carbono atmosférico ocupa un lugar central en comparación con el de otros gases efecto invernadero.

1.3 Políticas ambientales para la reducción del carbono atmosférico en la economía

En esta sección se pretende hacer evidente la relevancia de la emisión de gases efecto invernadero, en especial el CO₂, como problema ambiental. Después se expone el tema de los modelos económicos y climáticos, como evidencia de que esta problemática ambiental específica ha cobrado importancia entre los temas de estudio económico, desde hace más o menos dos décadas.

1.3.1 Ciclo del carbono, gases efecto invernadero y cambio climático

El carbono es el elemento esencial de la biosfera²¹. Menos del 1% del carbono de la Tierra participa en el ciclo del carbono. La mayor cantidad de carbono del planeta está en los sedimentos de carbonato de calcio en la litosfera²², sobre todo en forma de carbonatos²³. En la atmósfera el carbono aparece en forma de bióxido de carbono, CO₂.

El ciclo del carbono consiste en lo siguiente. El CO₂ atmosférico y el que está disuelto en hidrosfera²⁴ es absorbido por las plantas verdes terrestres y acuáticas mediante

²¹ Se refiere a los seres vivos del planeta Tierra o el medio donde se desarrollan.

²² Geología. Envoltura rocosa que constituye la corteza exterior sólida del globo terrestre.

²³ Química. Sal del ácido carbónico con una base.

²⁴ Conjunto de partes líquidas del globo terráqueo.

la fotosíntesis, proceso por el cual obtienen energía y durante el cual también liberan hacia la atmósfera y la hidrosfera parte del CO₂. Los animales comen las plantas directa o indirectamente. El alimento se oxida biológicamente, lo cual produce CO₂ y agua. Los animales terrestres y acuáticos devuelven así el CO₂ a la atmósfera e hidrosfera.

Fenómenos geológicos que datan de millones de años atrás, transformaron los restos de seres vivos en depósitos de carbón, petróleo y gas natural que están en la litósfera. Durante la combustión de carburantes fósiles provocada por el hombre, uno de los productos más importantes que se generan es el dióxido de carbono. Éste entra a la atmósfera, perturbando el ciclo natural del carbono.

El efecto invernadero es un fenómeno natural de los planetas dotados de atmósfera, como la Tierra, que consiste en que ciertos gases atmosféricos retienen la energía que emite la superficie del planeta luego de haber sido calentada por la radiación estelar. En nuestro planeta el efecto invernadero es necesario para preservar la vida. El vapor de agua o H₂O, es el gas que causa hasta 70% del efecto invernadero. El CO₂ causa hasta el 26% y luego siguen el metano (CH₄) y el ozono (O₃).

Las actividades humanas contribuyen de manera antinatural al efecto invernadero con la emisión de CO₂, CH₄, óxidos de nitrógeno y clorofluorocarbonos. Los compuestos clorofluorocarbonados aceleran velocidad natural de destrucción de la capa de ozono, aunque la velocidad natural de formación de la misma permanece igual.

El calentamiento global o cambio climático es el aumento de la temperatura media de la superficie terrestre desde mediados del siglo XX hasta ahora. La mayoría de la comunidad científica apunta a que tiene causas antropogénicas, del modo que se indicó.

El Protocolo de Kioto sobre el cambio climático es un acuerdo internacional que pretende reducir la emisión mundial de los gases de efecto invernadero CO₂, CH₄, monóxido de dinitrógeno (N₂O), hidrofluorocarbonos, perfluorocarbonos y hexafluoruro de azufre. Fue adoptado en 1997 en Kioto, Japón, pero entró en vigor en 2005. Cada país se comprometió a reducir su nivel de emisiones a una tasa específica. En 2009 ratificaron el protocolo 187 países. Estados Unidos no ratificó el protocolo, a pesar de ser el país más contaminador del mundo.

“El dióxido de carbono (CO₂) representa en torno al 80% del total de las emisiones causantes del calentamiento global y, por tanto, ocupa un lugar central en las políticas de control.” (Gago, Labandeira y Rodríguez (2004); p. 2). En algunos países existen impuestos que pretenden limitar la emisión de CO₂, a través de gravámenes sobre los productos, la producción y/o la importación de combustibles fósiles. También existen los bonos de carbono, negociados en un mercado de carbono, que premian los esfuerzos por reducir el nivel de emisiones de CO₂ y fueron propuestos por el Protocolo de Kioto.

En las investigaciones que se hacen sobre modelos para la evaluación de políticas ambientales para la reducción de gases efecto invernadero, cuando se habla de *gases efecto invernadero* casi siempre se refieren únicamente al CO₂, como si fueran sinónimos. Otras pocas investigaciones incluyen por ejemplo el dióxido de azufre (SO₂) y óxidos de

nitrógeno (NO_x) (esta notación se utiliza para representar colectivamente al óxido nítrico (NO) y al dióxido de nitrógeno (NO₂)).

1.3.2 Modelos de análisis integrado o modelos económicos y climáticos

Existen modelos económicos especialmente diseñados para analizar políticas ambientales de reducción de gases efecto invernadero. Sus autores pretenden “integrar en un mismo modelo elementos económicos y ambientales que interactúan entre ellos” (Gago et. al. (2004)). Se llaman modelos de análisis integrado o modelos económicos y climáticos.²⁵ Otras definiciones son las siguientes.

Jensen y Traeger (2012); p. 3, dicen que “los modelos de análisis integrado incrustan un modelo de la economía mundial en un modelo del sistema climático para analizar sus interacciones”. Se tiene una función de utilidad sujeta a las restricciones impuestas a la economía enriquecida por el clima. El tomador de decisiones pretende elegir la combinación óptima de nivel de abatimiento de emisiones e inversión.

Ackerman, DeCanio, Howarth y Sheeran (2009); p. 4, dicen que:

Los modelos de análisis integrado, como la teoría económica de la que derivan, parten de una comprensión particular de la naturaleza humana y las preferencias y tratan de identificar las opciones que maximicen la satisfacción de esos deseos. Las salidas climáticas entran en el análisis como factores que aumentan o disminuyen la satisfacción humana. La meta “óptima” no es un nivel seguro o predeterminado de estabilización climática, sino más bien la satisfacción subjetiva máxima.

Entre los más famosos modelos de análisis integrado están:

- a) El modelo *PAGE*²⁶ de Hope y otros (1993),
- b) los modelos *RICE*²⁷ de Nordhaus (1996, 2010),
- c) el modelo *MERGE*²⁸ de Manne y Richels (1992, 1995, 1999 y 2000),
- d) el modelo *Green*²⁹ de la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico y
- e) los modelos *DICE*³⁰ de Nordhaus (1977, 1991, 1994, 1999, 2004, 2008, 2013).

Döll (2009) proporciona una útil reseña de algunos de los modelos anteriores. Con base en eso, aquí se explica lo siguiente.

²⁵ *Integrated Analysis Models (IAM)*

²⁶ *Policy Analysis of the Greenhouse Effect*, Análisis de Políticas para el Efecto Invernadero.

²⁷ *Regional Interactions of Climate Ecosystems*, Modelo Regional Integrado de Clima y Economía.

²⁸ *A Model for Evaluating Regional and Global Effects of GHG reduction policies*, Modelo para Evaluar Efectos Globales y Regionales de las políticas de reducción de gases efecto invernadero.

²⁹ Modelo Verde.

³⁰ *Dynamic Integrated Climate Economy model*, modelo Dinámico Integrado de Clima y Economía.

Los modelos *DICE* analizan a nivel mundial y no distinguen sectores ni categorías económicas o no económicas. Se basan en un análisis costo-beneficio para calcular el saldo óptimo entre la reducción de gases efecto invernadero y los daños económicos provocados por el cambio climático, con objeto de maximizar el bienestar intertemporal. Esto es, tanto el calentamiento global provocado por las emisiones de gases efecto invernadero como los esfuerzos por reducir tales emisiones tienen un costo económico para la sociedad. Incluyen una función de producción de elasticidad constante que determina el producto mundial bruto y cuyas entradas son el capital y el trabajo, y una tasa de crecimiento tecnológico exógena. Tienen ecuaciones que representan cómo la emisión de gases efecto invernadero provoca el calentamiento global y una función de reducción de las emisiones.

Los modelos *RICE* son una versión regional del modelo *DICE*. Se divide al mundo en trece regiones. A cada región se le asigna una función diferente de daño climático. Existen diversas estrategias de reducción de emisiones que pueden aplicarse en una o varias regiones. Cuando las estrategias se aplican en una región para maximizar su beneficio local y no de forma cooperativa, se obtienen reducciones muy modestas en las emisiones.

Los modelos *MERGE* se basan en modelos *DICE* o *RICE*, pero dividen al mundo en cinco regiones e incluyen dos categorías de daño: Daño de mercado y daño no de mercado. El diseño permite calcular el equilibrio óptimo entre la reducción de los gases de efecto invernadero y los daños económicos por el calentamiento global.

El modelo *PAGE* utiliza ecuaciones más simples. Divide al mundo en ocho regiones y los daños se dividen en económicos y no económicos. Su objetivo es ayudar a comparar los efectos de diferentes políticas ambientales relativas al calentamiento global.

CAPÍTULO 2. UN MODELO DE ANÁLISIS INTEGRADO

En este capítulo se expone la estructura general de los modelos de análisis integrado. Después se muestra la estructura específica del Modelo Dinámico Integrado de Clima y Economía de Nordhaus y Sztorc (2013) que, como ya se mencionó, es un caso específico de los modelos de análisis integrado.

2.1 Estructura general de un modelo de análisis integrado

En el capítulo anterior se definieron los modelos económicos y climáticos o modelos de análisis integrado. En seguida se explican las características principales de sus ecuaciones.

2.1.1 Elementos

Un modelo de análisis integrado contiene ecuaciones económicas, ecuaciones ecológicas y ecuaciones que relacionan tales ecuaciones entre sí, esto es, hay un modelo económico y un modelo ecológico interactuando. Como es de esperarse, debido a la parte económica habrá variables como capital, fuerza laboral, nivel de producción, nivel de consumo, tasa de ahorro, inversión, distribución del ingreso y bienestar y parámetros como tasa de depreciación del capital y elasticidad de la producción económica del capital. Por la parte ecológica se tendrán variables como temperatura atmosférica, temperaturas del océano, masa de gases efecto invernadero atmosférico, emisión anual de gases de efecto invernadero, fuerza radiactiva de la acumulación de los gases de efecto invernadero y parámetros como tasa marginal de retención atmosférica y la tasa de absorción de carbono atmosférico debida a los fondos oceánicos. Las variables que conciernen a ambos modelos son, por ejemplo, los factores que reflejan el costo de reducción de las emisiones y los daños causados por el calentamiento global en la producción económica total y un factor de intensidad de las emisiones de carbono generadas según el nivel de producción.

En un modelo de análisis integrado convencional se asume:

- a) Una ecuación del ciclo del carbono.
- b) Ecuaciones de temperatura.

- c) Un modelo de crecimiento económico de Ramsey (1928) – Koopmans (1963) – Cass (1965).
- d) Una tasa de crecimiento tecnológico.
- e) Una tasa de crecimiento poblacional.
- f) Una ecuación de acumulación del capital.
- g) Una ecuación que indica que la producción agregada de bienes genera emisiones atmosféricas.
- h) El stock de emisiones atmosféricas genera el calentamiento global. El aumento de la temperatura promedio mundial respecto el año 1900 causa daños que se traducen en una merma del producto mundial bruto.
- i) El tomador de decisiones o planificador social puede utilizar parte del producto en abatimiento de las emisiones.
- j) El tomador de decisiones busca la combinación óptima de nivel de abatimiento de emisiones e inversión para maximizar la función de bienestar social.
- k) Hay un único agente representativo en cada generación, o sea todos los miembros de una generación tienen preferencias de consumo idénticas.
- l) La función de bienestar social se extiende hacia el futuro lejano y generalmente tiene la forma:

$$\text{Caso discreto: } W = \sum_{t=1}^{T_{max}} (1 + \rho)^{-t} U[c(t)] \quad (2.1.1)$$

$$\text{Caso continuo: } W = \int_0^{\infty} e^{-\rho t} U[c(t)] dt \quad (2.1.2)$$

En las fórmulas anteriores:

W : Función objetivo de bienestar social.

ρ : Tasa pura de preferencia temporal social; esto es, indica la preferencia del consumo actual sobre el consumo de mañana.

$c(t)$: Consumo en el tiempo t .

$U(c(t))$: Función de utilidad del consumo.

En la fórmula (2.1.1) T_{max} es el valor máximo que toma t .

Ackerman et. al. (2009) explican que $e^{-\rho t}$ puede interpretarse como el peso relativo dado a la utilidad o bienestar de varias generaciones. En (2.1.2) una $\rho > 0$ implica que el bienestar de esta generación importa más que el de la siguiente. Lo más justo parece ser $\rho = 0$. Sin embargo, asumir $\rho > 0$ es una necesidad matemática para que la integral de (2.1.2) converja ante una utilidad futura creciente, constante o que disminuye muy lentamente.

- m) La función de utilidad de un modelo de análisis integrado es una función de aversión relativa al riesgo constante. La sección siguiente tiene la finalidad de esclarecer este concepto.

2.1.2 Función de utilidad de aversión relativa al riesgo constante

Para construir esta sección se consultó especialmente a Conesa y Garriga (2006). Aquí se exponen algunas medidas de aversión al riesgo y el nombre que se les da a algunas funciones de utilidad según eso. Entre tales funciones se encuentra la función de utilidad de aversión relativa al riesgo constante.

Medidas de aversión al riesgo

Un individuo amante del riesgo tiene preferencias que pueden representarse con una función de utilidad estrictamente convexa. La aversión al riesgo se mide por el grado de concavidad de la función de utilidad que representa sus preferencias. Algunas medidas del grado de concavidad de la función de utilidad son la medida 1, la medida de aversión absoluta de Arrow y Pratt y la medida de aversión relativa Arrow y Pratt.

La medida 1 es $-U''$ y representa la curvatura de una función de utilidad cóncava. Cuanto mayor es la medida 1 mayor es la concavidad de U . Tiene la desventaja de que una transformación afín suya, esto es $U^{\text{afin}} = aU + b$ para $a, b \in \mathbb{R}$, aunque conserva el orden de las preferencias no arroja el mismo grado de aversión al riesgo.

La medida de aversión absoluta de Arrow y Pratt es:

$$R_A(c) = -\frac{U''(c)}{U'(c)}$$

Ésta resiste transformaciones afines. Sin embargo, tiene la desventaja de que a dos individuos que están dispuestos a arriesgar sumas de dinero idénticas se les asigna la misma medida, a pesar de que dicha suma represente proporciones distintas de la riqueza de cada uno; por ejemplo, para uno rico significa arriesgar una cantidad insignificante y para uno pobre, casi todo su dinero.

La medida de aversión relativa de Arrow y Pratt es:

$$R_R(c) = -\frac{U''(c)}{U'(c)} \cdot c$$

Ésta resiste transformaciones afines y considera la riqueza del individuo.

Tipos de funciones de utilidad según sus medidas de aversión al riesgo

Una función cuadrática tiene la forma:

$$U(c) = c - \frac{ac^2}{2}$$

para $a \in \mathbb{R}, a > 0$; $c < 1/a$ si se quiere $U'(c) > 0$.

Para la función cuadrática se tiene:

$$R_A(c) = \frac{a}{1-ac} \quad \text{y} \quad R_R(c) = \frac{ac}{1-ac}$$
$$\therefore \frac{\partial R_A(c)}{\partial c} = \frac{a^2}{(1-ac)^2} > 0 \quad \text{y} \quad \frac{\partial R_R(c)}{\partial c} = \frac{a}{(1-ac)^2} > 0$$

Tanto la aversión absoluta al riesgo de la función cuadrática como la relativa son crecientes en c . Una aversión al riesgo creciente respecto m contradice la suposición de que cuanto más dinero tiene un individuo, está más dispuesto a invertir en activos riesgosos.

La función de aversión absoluta al riesgo constante, *constant absolute risk aversion*, *CARA*, tiene la forma:

$$U(c) = -\frac{e^{-\gamma c}}{\gamma}$$

para $\gamma \in \mathbb{R}$ y $\gamma > 0$.

Para la función *CARA* se tiene:

$$R_A(c) = \gamma \quad \text{y} \quad R_R(c) = \gamma c$$
$$\therefore \frac{\partial R_A(c)}{\partial c} = 0 \quad \text{y} \quad \frac{\partial R_R(c)}{\partial c} = \gamma > 0$$

La aversión absoluta al riesgo de la función *CARA* respecto c es constante. La aversión relativa al riesgo de la función *CARA* respecto c es creciente.

La función de aversión relativa al riesgo constante, *constant relative risk aversion*, *CRRA*, tiene la forma:

$$U(c) = \frac{c^{1-\eta} - 1}{1-\eta} \tag{2.1.3}$$

para $\eta \in \mathbb{R}$, $\eta \geq 0$ y $\eta \neq 1$.

Si $\eta < 0$ la función no es cóncava y el individuo gusta del riesgo.

Para la función *CRRA* se tiene:

$$R_A(c) = \frac{\eta}{c} \text{ y } R_R(c) = \eta$$

$$\therefore \frac{\partial R_A(c)}{\partial c} = -\frac{\eta}{c^2} < 0 \text{ y } \frac{\partial R_R(c)}{\partial c} = 0$$

La aversión absoluta al riesgo de la función *CRRA* respecto c es decreciente. La aversión relativa al riesgo de la función *CRRA* es constante.

Cabe observar:³¹

$$\lim_{\eta \rightarrow 1} U(c) = \lim_{\eta \rightarrow 1} \frac{c^{1-\eta} - 1}{1 - \eta} = \frac{\lim_{\eta \rightarrow 1} \frac{d(c^{1-\eta} - 1)}{d\eta}}{\lim_{\eta \rightarrow 1} \frac{d(1 - \eta)}{d\eta}} = \frac{\lim_{\eta \rightarrow 1} \left[c^{1-\eta} \cdot \ln c \cdot \frac{d(1 - \eta)}{d\eta} \right]}{-1} = \ln c$$

O sea, cuando $\eta \rightarrow 1$ la función *CRRA* tiende a la función logaritmo natural. La función de utilidad logaritmo natural es un caso particular de la *CRRA* con $R_R(c) = 1$.

Se concluye esta sección señalando finalmente que los modelos de análisis integrado tienen función de utilidad de la forma de (2.1.3). Para $\eta > 0$, la utilidad marginal de consumo está dada por $U'(c) = c^{-\eta}$, que es decreciente respecto c .

2.2 Modelo Dinámico Integrado de Clima y Economía 2013

En seguida se exponen las ecuaciones y variables del Modelo Dinámico Integrado de Clima y Economía, más conocido como *DICE-2013*, que puede verse en Nordhaus y Sztorc (2013).³²

2.2.1 Función de bienestar social

Aquí se muestran la función de utilidad y la función de bienestar social.

Función de utilidad

La función de utilidad en el tiempo t se denota como $U_{\text{periodo}}(t)$ y se define:

³¹ Se aplica la regla de L'Hospital para resolver la indeterminación en el límite.

³² Ver Apéndices 1 y 2.

$$U_{periodo}(t) = U_{instantánea}(c(t)) \cdot L(t) \cdot R(t) \quad (2.2.1)$$

Aquí $U_{instantánea}(c(t))$ es la función de utilidad instantánea del consumo en t ; $c(t)$ es el consumo mundial per cápita en t , medido en dólares estadounidenses de 2005 por año; $L(t)$ es el tamaño de la población mundial en t , considerada como la fuerza laboral mundial y se mide en millones de personas y $R(t)$ es el factor o tasa de descuento de la utilidad social promedio en t .

La función de utilidad instantánea o de bienestar social instantáneo está dada por:

$$U_{instantánea}(c(t)) = \frac{(c(t))^{1-\eta} - 1}{1 - \eta} \quad (2.2.2)$$

Lo anterior es evidentemente una función de aversión relativa al riesgo constante. El parámetro η es la elasticidad de la utilidad marginal del consumo y también es la aversión relativa al riesgo del individuo representativo. Se recuerda que $\eta \in \mathbb{R}$, $\eta \geq 0$ y $\eta \neq 1$.

Consumo

La relación entre $c(t)$ y el consumo mundial agregado $C(t)$ en t medido en dólares estadounidenses de 2005 por año es:

$$c(t) = 1000 \cdot \frac{C(t)}{L(t)} \quad (2.2.3)$$

El consumo mundial agregado se multiplica por 1000 debido a las distintas denominaciones de valor para consumo y población en el modelo.

Se define $C(t) \geq 0$.

Fuerza laboral

La población tiene la dinámica siguiente:

$$L(t + 1) = L(t) \cdot \left(\frac{popasintotica}{L(t)} \right)^{popadj} \quad (2.2.4)$$

$$\text{y } L(1) = L_0 \quad (2.2.5)$$

El parámetro L_0 indica el nivel de población inicial, $popadj$ es la tasa de crecimiento para calibrar al año 2050 la proyección de población y $popasintotica$ es el nivel asintótico³³ de población.

La tasa de descuento de la utilidad social promedio en t está dada por:

$$R(t) = \frac{1}{(1 + \rho)^{tstep \cdot (t-1)}} \quad (2.2.6)$$

Aquí ρ es la tasa inicial de preferencia temporal social por año, o sea, indica la preferencia del consumo actual sobre el consumo de mañana. Por su parte $tstep$ es el número de años que hay entre cada punto del tiempo muestreado; por ejemplo, si se toman datos en los años 2010, 2015, 2020, etc., entonces $tstep = 5$. La variable discreta t tomará valores enteros que estén en concordancia con esto; por ejemplo, para el año 2010 se tendrá $t = 1$, para el año 2015 se tendrá $t = 2$, para el año 2020 se tendrá $t = 3$, etc.

Función de bienestar social

Se asume que el mundo tiene preferencias bien definidas, que pueden ser representadas por la función de bienestar social siguiente:

$$W = tstep \cdot scale1 \cdot \sum_{t=1}^{T_{max}} U_{periodo}(t) + scale2 \quad (2.2.7)$$

Aquí $scale1$ y $scale2$ son coeficientes de escalamiento innecesarios para los cálculos pero aplicados por conveniencia. Por su parte T_{max} es el valor máximo que toma t .

Es evidente que W es la función objetivo que se pretende maximizar. Mide el valor presente de la utilidad en unidades de utilidad.

2.2.2 Función de producción ajustada por daño climático

Se asume que el cambio climático causa una carga para la sociedad, por lo que la producción se vuelve menos eficiente. Así, se llama producción bruta al nivel de producción económica común, y producción neta de daños climáticos al nivel de producto mermado por causa de los cambios de temperatura en la atmósfera.

Producto bruto

Se asume la siguiente función de producción, que mide el producto mundial bruto en t en billones de dólares de 2005 por año. Claramente es una tecnología Cobb-Douglas.

³³ asintótico(ca): Dicho de una curva: Que se acerca de continuo a una recta o a otra curva sin llegar nunca a encontrarla.

$$Y_{bruta}(t) = A(t)(K(t))^{\gamma} \left(\frac{L(t)}{1000} \right)^{1-\gamma} \quad (2.2.8)$$

El valor inicial de $Y_{bruta}(t)$ está dado por el parámetro $Y_{bruta,0}$, o sea:

$$Y_{bruta}(1) = Y_{bruta,0} \quad (2.2.9)$$

Se define $Y_{bruta}(t) \geq 0$.

En seguida se explican las variables y parámetros de (2.2.8).

Stock tecnológico

La variable $A(t)$ denota el nivel mundial en t del llamado stock tecnológico o productividad total de los factores. Se recuerda que este factor refleja que si la tecnología mejora con el tiempo se obtiene una mayor producción para una misma cantidad de insumos. Su dinámica está dada por:

$$A(t+1) = \frac{A(t)}{(1 - g_A(t))} \quad (2.2.10)$$

La variable $g_A(t)$ denota la tasa exógena de crecimiento de la productividad total de los factores en $tstep$ años y está dada por:

$$g_A(t) = g_{A,0} \cdot e^{-dela \cdot tstep \cdot (t-1)} \quad (2.2.11)$$

Aquí $dela$ es la tasa de declive de la productividad total de los factores para $tstep$ años y $g_{A,0}$ es el nivel inicial de la tasa de productividad total de los factores en $tstep$ años.

Para (2.2.10) se define:

$$A(1) = A_0 \quad (2.2.12)$$

Aquí A_0 es el nivel inicial de la productividad total de los factores.

Stock de capital

El capital social o balance de capital o stock mundial de capital se mide en billones de dólares de 2005 y evoluciona en el tiempo según la ecuación en diferencias:

$$K(t+1) = (1 - \delta_K)^{tstep} K(t) + tstep \cdot I(t) \quad (2.2.13)$$

Aquí δ_K es la tasa anual de depreciación del capital. La variable $I(t)$ es la inversión en t medida en billones de dólares de 2005 por año.

A la ecuación (2.2.13) se le llama ecuación del balance del capital.

El valor inicial de $K(t)$ está dado por el parámetro K_0 , o sea:

$$K(1) = K_0 \quad (2.2.14)$$

Debe tenerse $K(t) \geq 0$ y $I(t) \geq 0$.

Elasticidad del capital

El parámetro γ en la función de producción (2.2.8) es la elasticidad del capital y es tal que $0 < \gamma < 1$.

Función de producción neta de daños climáticos

El producto mundial neto de daños climáticos presenta la relación entre lo económico y lo ecológico. Se mide en billones de dólares de 2005 por año. Evaluado en t está dado por:

$$Y_{neta}(t) = (1 - \Omega(t))Y_{bruta}(t) \quad (2.2.15)$$

Aquí $\Omega(t)$ es la fracción en que se merma la producción bruta en t por causa de los cambios de temperatura en la atmósfera y se aproxima con una función polinómica de la temperatura como sigue:

$$\Omega(t) = \psi_1 T_{ATM}(t) + \psi_2 (T_{ATM}(t))^{\psi_3} \quad (2.2.16)$$

Aquí $T_{ATM}(t)$ es el incremento en t de la temperatura atmosférica respecto el año 1900, medido en °C; se presentará más adelante. Por su parte ψ_1, ψ_2 y ψ_3 son parámetros de $\Omega(t)$.

Los daños económicos anuales en billones de dólares de 2005 en el período t son entonces:

$$daño(t) = \Omega(t) \cdot Y_{bruta}(t) \quad (2.2.17)$$

A la función $\Omega(t)$ se le llama función de daño económico. Aquí se prefiere no usar ese nombre para no confundirla con la variable $daño(t)$, dado que resulta lógico que ésta última también podría llamarse de ese modo.

2.2.3 Función de producción ajustada por daño climático y costo de abatimiento

Luego de obtener la producción neta de daños climáticos hay que restar los costos de abatimiento de las emisiones de carbono para obtener la producción mundial neta de daños y costo del control de las emisiones.

Producción neta de daños y costo del control de las emisiones

El producto mundial bruto neto de daños y costos del control de las emisiones en t medido en billones de dólares de 2005 por año se denota $Q(t)$ y se calcula:

$$Q(t) = Y_{neta}(t) - \Lambda_c(t) \quad (2.2.18)$$

Aquí $\Lambda_c(t)$ es el costo en t del abatimiento de emisiones.

Se define $Q(t) \geq 0$.

Costo de abatimiento de las emisiones

El costo de reducción de emisiones en t medido en billones de dólares de 2005 por año está dado por:

$$\Lambda_c(t) = Y_{bruta}(t) \cdot \theta_1(t) \cdot (\mu(t))^{\theta_2} \cdot (\varphi(t))^{1-\theta_2} \quad (2.2.19)$$

La siguiente variable no aparece explícitamente en Nordhaus y Sztorc (2013) sin embargo hay variables análogas en versiones anteriores de los modelos *DICE*; aquí se incluye por considerarla relevante por sí misma:

$$\Lambda(t) = \theta_1(t) \cdot (\mu(t))^{\theta_2} \cdot (\varphi(t))^{1-\theta_2} \quad (2.2.20)$$

El costo de reducción de emisiones $\Lambda_c(t)$ puede escribirse en términos de $\Lambda(t)$ como sigue:

$$\Lambda_c(t) = Y_{bruta}(t) \cdot \Lambda(t) \quad (2.2.21)$$

En lo anterior se ve claramente que la variable $\Lambda(t)$ representa la fracción en que se merma la producción bruta en t debido a los costos de abatimiento de emisiones.

Así pues, los siguientes son variables y parámetros de $\Lambda_c(t)$ o de $\Lambda(t)$. La variable $\theta_1(t)$ se llama³⁴ costo ajustado del precio tope y se define más adelante, $\theta_2 > 0$ es un parámetro, $\mu(t)$ es la tasa de abatimiento o tasa de control de las emisiones de gases efecto invernadero en t y $\varphi(t)$ es la tasa de participación o fracción de las emisiones en t , incluidas en la política.

³⁴ *adjusted cost for backstop*

Costo ajustado por precio tope

El costo ajustado por precio tope en t está definido por:

$$\theta_1(t) = 1000 \cdot \frac{P_{bt}(t) \cdot \sigma(t)}{\theta_2} \quad (2.2.22)$$

Aquí la variable $P_{bt}(t)$ es³⁵ un precio tope en t . Por su parte $\sigma(t)$ es el ratio de salida de las emisiones de carbono equivalente en t y se explica en la sección de ecuaciones de las emisiones de carbono.

El precio tope en t está dado por:

$$P_{bt}(t) = P_b \cdot (1 - g_b)^{(t-1)} \quad (2.2.23)$$

Aquí el parámetro P_b es³⁶ el costo de precio tope medido en dólares de 2005 por tonelada de CO₂ del año 2010. Por su parte g_b es³⁷ el decremento inicial del costo de precio tope por periodo.

Tasa de control de las emisiones

La tasa de abatimiento es la fracción en que las emisiones de CO₂ se reducen en comparación con su nivel no controlado.

El valor inicial de $\mu(t)$ está dado por el parámetro μ_0 , o sea, $\mu(1) = \mu_0$.

Se establece el límite $\mu_{superior}(t)$ para la tasa de control en t , dado por:

$$\mu_{superior}(t) = \begin{cases} 1 & t < 30 \\ \mu_{limite} \cdot \varphi(t) & \text{otro caso} \end{cases} \quad (2.2.24)$$

Aquí μ_{limite} es el límite superior de la tasa de control después del año 2150.

Fracción de las emisiones en el régimen de control

La fracción de las emisiones en el régimen de control en t están dadas por:

$$\varphi(t) = \begin{cases} \varphi_1 + (\varphi_{21} - \varphi_1) \cdot \frac{(t-1)}{\varphi_2} & t < \varphi_2 + 1 \\ \varphi_{21} & t > \varphi_2 \end{cases} \quad (2.2.25)$$

³⁵ *backstop price*

³⁶ *cost of backstop*

³⁷ *initial cost decline backstop cost per period*

Nordhaus y Sztorc (2013) se refieren a los parámetros anteriores como parámetros de participación; en específico, φ_1 es³⁸ la fracción de las emisiones bajo control en 2010, φ_{21} es³⁹ la fracción de las emisiones bajo control el tiempo reglamentario y φ_2 es el período en el que se tiene plena participación⁴⁰.

El valor inicial de $\varphi(t)$ está dado por el parámetro φ_1 , es decir:

$$\varphi(1) = \varphi_1 \quad (2.2.26)$$

Costo marginal de abatimiento de las emisiones

Se denota $\Lambda_{cm}(t)$ costo marginal de abatimiento en t medido en dólares de 2005 por tonelada de CO₂ y está dado por:

$$\Lambda_{cm}(t) = P_{bt}(t) \cdot (\mu(t))^{\theta_2-1} \quad (2.2.27)$$

Precio del carbono

El precio del carbono en t , denotado por $P_{carbono}(t)$, se mide en dólares del 2005 por tonelada de CO₂ y está dado por:

$$P_{carbono}(t) = P_{bt}(t) \cdot \left(\frac{\mu(t)}{\varphi(t)} \right)^{\theta_2-1} \quad (2.2.28)$$

2.2.4 Ecuaciones de las emisiones de carbono

Estas ecuaciones representan el tamaño de las emisiones de carbono.

Emisiones de carbono

Las emisiones de carbono en t se denotan $E(t)$ y se miden en gigatoneladas de CO₂ por año; pueden ser industriales o por deforestación, denotadas respectivamente $E_{ind}(t)$ y $E_{def}(t)$. Entonces se tiene:

$$E(t) = E_{ind}(t) + E_{def}(t) \quad (2.2.29)$$

Las emisiones industriales son endógenas y las emisiones por deforestación son exógenas.

Las emisiones industriales están dadas por:

³⁸ fraction of emissions under control in 2010

³⁹ fraction of emissions under control at full time

⁴⁰ period at which have full participation

$$E_{ind}(t) = \sigma(t) \cdot Y_{bruta}(t) \cdot (1 - \mu(t)) \quad (2.2.30)$$

Las emisiones por deforestación se definen:

$$E_{def}(t) = E_{Tierra,0} \cdot (1 - d_{Tierra})^{t-1} \quad (2.2.31)$$

Aquí $E_{Tierra,0}$ son las emisiones de carbono de la Tierra, medidas en gigatoneladas de CO₂ por año y d_{Tierra} es la tasa de disminución de las emisiones terrestres por período.

Ratio de salida de las emisiones de carbono equivalente

Como puede verse en fórmula (2.2.30), el ratio de salida de las emisiones de carbono equivalente en t es un factor de intensidad de las emisiones industriales de CO₂ generadas según el nivel de producto bruto. Se mide en toneladas de carbono por mil dólares de producto. El decrecimiento de $\sigma(t)$ representa la descarbonización de la economía. Este ratio sigue la dinámica:

$$\sigma(t + 1) = \sigma(t) \cdot e^{g_{\sigma}(t) \cdot tstep} \quad (2.2.32)$$

Aquí $g_{\sigma}(t)$ es la tasa anual continua exógena de crecimiento de $\sigma(t)$; representa la mejora acumulada de la eficiencia energética y sigue la dinámica:

$$g_{\sigma}(t + 1) = g_{\sigma}(t) \cdot (1 + d_{\sigma})^{tstep} \quad (2.2.33)$$

Aquí d_{σ} es la tasa de disminución de la descarbonización por período.

El valor inicial de $\sigma(t)$ está dado por el parámetro σ_0 , o sea:

$$\sigma(1) = \sigma_0 = \frac{E_{Ind,0}}{Y_{bruta,0} \cdot (1 - \mu_0)} \quad (2.2.34)$$

Aquí σ_0 es la intensidad del carbono en el año 2010, medido en kilogramos de CO₂ por producto del 2010 en dólares de 2005; $E_{Ind,0}$ son las emisiones industriales del año 2010, medidas en gigatoneladas de carbono por año; $Y_{bruta,0}$ es el producto mundial bruto inicial medido en billones de dólares de 2005; μ_0 es la tasa inicial de control de las emisiones para el caso base del año 2010.

El valor inicial de $g_{\sigma}(t)$ está dado por el parámetro $g_{\sigma,0}$, o sea:

$$g_{\sigma}(1) = g_{\sigma,0} \quad (2.2.35)$$

Emisiones industriales de carbono acumuladas

Sea $E_{indac}(t)$ la notación para las emisiones industriales de carbono acumuladas en t , medidas en gigatoneladas de carbono; esta variable sigue la dinámica:

$$E_{indac}(t + 1) = E_{indac}(t) + E_{ind}(t) \cdot \left(\frac{5}{3.666}\right) \quad (2.2.36)$$

2.2.5 Ecuaciones de las masas de carbono

Estas son ecuaciones del ciclo del carbono y el cambio climático.

Masas de carbono

Sea $M_{ATM}(t)$ el aumento de la concentración de carbono atmosférico en t , respecto al año 1750, medido en gigatoneladas de carbono. Su dinámica está dada por:

$$M_{ATM}(t + 1) = \phi_{11}M_{ATM}(t) + \phi_{21}M_{UP}(t) + \frac{5}{3.666} \cdot E(t) \quad (2.2.37)$$

Los parámetros ϕ_{11} y ϕ_{21} se explican más adelante. La variable $M_{UP}(t)$ es el aumento de la concentración de carbono en la parte superior de los océanos en t , respecto al año 1750, medido en gigatoneladas de carbono. Su dinámica está dada por:

$$M_{UP}(t + 1) = \phi_{12}M_{ATM}(t) + \phi_{22}M_{UP}(t) + \phi_{32}M_{LO}(t) \quad (2.2.38)$$

Los parámetros ϕ_{12} , ϕ_{22} y ϕ_{32} se explican más adelante. La variable $M_{LO}(t)$ es el aumento de la concentración de carbono en la profundidad de los océanos en t , respecto al año 1750, medido en gigatoneladas de carbono. Su dinámica está dada por:

$$M_{LO}(t + 1) = \phi_{23}M_{UP}(t) + \phi_{33}M_{LO}(t) \quad (2.2.39)$$

Los parámetros ϕ_{23} y ϕ_{33} se explican a continuación, junto con los que quedaron pendientes.

Los parámetros ϕ_{11} , ϕ_{21} , ϕ_{12} , ϕ_{22} , ϕ_{32} , ϕ_{23} y ϕ_{33} son para la consistencia del ciclo del carbono a largo plazo y se llaman parámetros para el ciclo del carbono.

En específico, ϕ_{11} denota la tasa de carbono de atmosférico que permanecerá en la atmósfera el período siguiente; ϕ_{21} denota la tasa de carbono de la parte superior de los océanos que pasará a formar parte del carbono atmosférico el período siguiente; ϕ_{12} denota la tasa de carbono de atmosférico que pasará a formar parte del carbono de la parte superior de los océanos el período siguiente; ϕ_{22} denota la tasa de carbono de la parte superior de los océanos que permanecerá en la parte superior de los océanos el período siguiente; ϕ_{23} denota la tasa de carbono de la parte superior de los océanos que pasará a formar parte del carbono de la profundidad de los océanos el período siguiente y ϕ_{33} denota la tasa de

carbono de la profundidad de los océanos que permanecerá en la profundidad de los océanos.

Además se tiene:

$$\phi_{11} = 1 - \phi_{12} \quad (2.2.40)$$

$$\phi_{21} = \phi_{12} \cdot \frac{M_{ATMEQ}}{M_{UPEQ}} \quad (2.2.41)$$

$$\phi_{22} = 1 - \phi_{21} - \phi_{23} \quad (2.2.42)$$

$$\phi_{32} = \phi_{23} \cdot \frac{M_{UPEQ}}{M_{LOEQ}} \quad (2.2.43)$$

$$\phi_{33} = 1 - \phi_{32} \quad (2.2.44)$$

Aquí M_{ATMEQ} es la concentración atmosférica de equilibrio, medida en gigatoneladas de carbono; M_{UPEQ} es la concentración de equilibrio de la parte superior de los océanos, medida en gigatoneladas de carbono y M_{LOEQ} es la concentración de equilibrio de la profundidad de los océanos, medida en gigatoneladas de carbono. Por su parte, ϕ_{12} y ϕ_{23} son parámetros flujo.

El valor inicial de $M_{ATM}(t)$ está dado por el parámetro $M_{ATM,0}$, o sea:

$$M_{ATM}(t) = M_{ATM,0} \quad (2.2.45)$$

El valor inicial de $M_{UP}(t)$ está dado por el parámetro $M_{UP,0}$, o sea:

$$M_{UP}(t) = M_{UP,0} \quad (2.2.46)$$

El valor inicial de $M_{LO}(t)$ está dado por el parámetro $M_{LO,0}$, o sea:

$$M_{LO}(t) = M_{LO,0} \quad (2.2.47)$$

Se define $M_{ATM}(t) \geq 0$, $M_{UP}(t) \geq 0$ y $M_{LO}(t) \geq 0$.

Forma matricial de las ecuaciones de masas de carbono

Las ecuaciones en diferencias (2.2.37), (2.2.38) y (2.2.39) forman un sistema de ecuaciones en diferencias que puede expresarse en forma matricial como sigue:

$$\begin{pmatrix} M_{ATM}(t+1) \\ M_{UP}(t+1) \\ M_{LO}(t+1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \phi_{11} & \phi_{21} & 0 \\ \phi_{12} & \phi_{22} & \phi_{32} \\ 0 & \phi_{23} & \phi_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} M_{ATM}(t) \\ M_{UP}(t) \\ M_{LO}(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{5}{3.666} \cdot E(t) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.2.48)$$

Se define un vector columna llamado masa de carbono, denotado $\mathbf{M}(t)$ para el tiempo t y dado por:

$$\mathbf{M}(t) = \begin{pmatrix} M_{ATM}(t) \\ M_{UP}(t) \\ M_{LO}(t) \end{pmatrix} \quad (2.2.49)$$

Se le llama matriz de transición del ciclo del carbono a la matriz de parámetros \mathbf{M}_ϕ dada por:

$$\mathbf{M}_\phi = \begin{pmatrix} \phi_{11} & \phi_{21} & 0 \\ \phi_{12} & \phi_{22} & \phi_{32} \\ 0 & \phi_{23} & \phi_{33} \end{pmatrix} \quad (2.2.50)$$

Es notorio que los elementos de la matriz anterior tienen subíndices de forma invertida respecto el lugar que ocupan en la matriz⁴¹. Esto se debe a que aquí ϕ_{ij} representa la tasa de transferencia del depósito de carbono i al depósito de carbono j , para $i = 1,2,3$, $j = 1,2,3$, por período, siendo el depósito de carbono 1 la atmósfera, el depósito de carbono 2 la parte superior de los océanos y el depósito de carbono 3 la profundidad de los océanos.

Se define un vector columna llamado emisiones de carbón, denotado $\mathbf{E}(t)$ para el tiempo t y dado por:

$$\mathbf{E}(t) = \begin{pmatrix} \frac{5}{3.666} \cdot E(t) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.2.51)$$

Entonces (2.2.48) puede escribirse:

$$\mathbf{M}(t+1) = \mathbf{M}_\phi \mathbf{M}(t) + \mathbf{E}(t) \quad (2.2.52)$$

2.2.6 Ecuaciones de fuerza radiactiva

En esta sección se ven las ecuaciones que dicen que la acumulación de gases efecto invernadero aumenta la fuerza radiactiva. En la sección siguiente se verá que la fuerza radiactiva hace que aumente la temperatura.

⁴¹ Generalmente el componente a_{ij} de una matriz ocupa la fila i y la columna j .

Fuerza radiactiva

El incremento de la fuerza radiactiva en t respecto el año 1900, medido en vatios por m^2 se denota $F(t)$ y está dado por:

$$F(t) = F_{2 \times CO_2} \cdot \left(\frac{\ln \left(\frac{M_{ATM}(t)}{588} \right)}{\ln 2} \right) + F_{EX}(t) \quad (2.2.53)$$

Aquí $F_{2 \times CO_2}$ es el aumento de la fuerza radiactiva debido a la duplicación de las concentraciones de CO_2 respecto el año 1900, medido en vatios por m^2 y $F_{EX}(t)$ es la fuerza radiactiva en t proveniente de otros gases efecto invernadero diferentes del CO_2 , medida en vatios por m^2 ; esta última sigue la dinámica:

$$F_{EX}(t) = \begin{cases} F_{EX,0} + \frac{1}{18} (F_{EX,1} - F_{EX,0})(t - 1) & t < 19 \\ F_{EX,0} + (F_{EX,1} - F_{EX,0}) & t \geq 19 \end{cases} \quad (2.2.54)$$

Aquí $F_{EX,0}$ es la fuerza radiactiva en el año 2010 proveniente de otros gases efecto invernadero diferentes del CO_2 , medida en vatios por m^2 y $F_{EX,1}$ es la fuerza radiactiva en el año 2100 proveniente de otros gases efecto invernadero diferentes del CO_2 , medida en vatios por m^2 .

2.2.7 Ecuaciones de temperatura

Estas ecuaciones también son del ciclo del carbono y cambio climático. Son ecuaciones de temperatura media global en la superficie y temperatura media global en los fondos oceánicos.

Temperatura media global en la superficie

Como se dijo anteriormente, $T_{ATM}(t)$ denota el incremento en t de la temperatura atmosférica respecto el año 1900, medido en $^{\circ}C$; su dinámica está dada por:

$$T_{AMT}(t + 1) = T_{ATM}(t) + \xi_1 \cdot \left(F(t + 1) - \lambda \cdot T_{ATM}(t) - \xi_2 \cdot (T_{ATM}(t) - T_{LO}(t)) \right) \quad (2.2.55)$$

Aquí ξ_1 se llama coeficiente de la ecuación climática para el estrato superior, ξ_2 se dice coeficiente de transferencia de estrato superior al inferior, $T_{LO}(t)$ es el incremento en t de la temperatura de los océanos inferiores respecto el año 1900, en $^{\circ}C$ y λ es un parámetro de realimentación que se define como:

$$\lambda = \frac{F_{2 \times CO_2}}{T_{2 \times CO_2}} \quad (2.2.56)$$

Aquí $T_{2 \times CO_2}$ es el impacto en la temperatura de equilibrio debido a la duplicación de las concentraciones de CO_2 respecto el año 1900, medido en $^{\circ}C$.

Se define $T_{ATM}(t) \geq 0$.

Temperatura media global en los océanos inferiores

$$T_{LO}(t + 1) = T_{LO}(t) + \xi_3(T_{ATM}(t) - T_{LO}(t)) \quad (2.2.57)$$

Aquí ξ_3 se llama coeficiente de transferencia para el estrato inferior.

Forma matricial de las ecuaciones de temperatura

Se reorganizan los términos de la ecuación en diferencias (2.2.55) se obtiene:

$$T_{AMT}(t + 1) = (1 - \xi_1\lambda - \xi_1\xi_2) \cdot T_{ATM}(t) + \xi_1\xi_2 \cdot T_{LO}(t) + \xi_1 \cdot F(t + 1) \quad (2.2.58)$$

Se reorganizan los términos de la ecuación en diferencias (2.2.57) como sigue:

$$T_{LO}(t + 1) = \xi_3 \cdot T_{ATM}(t) + (1 - \xi_3) \cdot T_{LO}(t) \quad (2.2.59)$$

Las ecuaciones en diferencias (2.2.58) y (2.2.59) pueden ponerse en forma matricial como sigue:

$$\begin{pmatrix} T_{AMT}(t + 1) \\ T_{LO}(t + 1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \xi_1\lambda - \xi_1\xi_2 & \xi_1\xi_2 \\ \xi_3 & 1 - \xi_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_{ATM}(t) \\ T_{LO}(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \xi_1 F(t + 1) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.2.60)$$

Se define un vector columna de temperaturas medias globales, denotado $\mathbf{T}(t)$ para el tiempo t y dado por:

$$\mathbf{T}(t) = \begin{pmatrix} T_{ATM}(t) \\ T_{LO}(t) \end{pmatrix} \quad (2.2.61)$$

Llámesese matriz de transición de temperaturas a la matriz de parámetros \mathbf{M}_ξ dada por:

$$\mathbf{M}_\xi = \begin{pmatrix} 1 - \xi_1\lambda - \xi_1\xi_2 & \xi_1\xi_2 \\ \xi_3 & 1 - \xi_3 \end{pmatrix} \quad (2.2.62)$$

Se define un vector columna llamado fuerza radiactiva, denotado $\mathbf{F}(t)$ para el tiempo t y dado por:

$$\mathbf{F}(t) = \begin{pmatrix} \xi_1 F(t+1) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.2.63)$$

Entonces (2.2.60) puede escribirse:

$$\mathbf{T}(t+1) = \mathbf{M}_\xi \mathbf{T}(t) + \mathbf{F}(t) \quad (2.2.64)$$

2.2.8 Ecuaciones presupuestales

Con estas ecuaciones económicas se termina de exponer el modelo.

Ecuación de consumo

$$C(t) = Q(t) - I(t) \quad (2.2.65)$$

Ecuación de tasa de ahorro

$$I(t) = s(t) \cdot Q(t) \quad (2.2.66)$$

Para $t > 50$ se considera que:

$$s(t) = s_{\text{óptimo}} \quad (2.2.67)$$

El parámetro $s_{\text{óptimo}}$ es la tasa de ahorro para el equilibrio asintótico y está dado por:

$$s_{\text{óptimo}} = \frac{\delta_K + 0.004}{\delta_K + 0.004\eta + \rho} \gamma \quad (2.2.68)$$

2.3 Recapitulando

En un modelo de análisis integrado, para establecer una política ambiental de reducción de emisiones de carbono atmosférico, el tomador de decisiones o planificador social debe proponer un nivel de tasa de reducción de las emisiones de CO₂ atmosférico para cada uno de los períodos del horizonte de planeación considerado, esto es, debe determinar $\mu(t)$ para cada $t = 1, 2, \dots, T_{\text{max}}$. En el modelo *DICE-2013* se tiene además otra variable de decisión, que es la tasa de ahorro mundial, $s(t)$. El problema que debe resolver el tomador de decisiones es encontrar la combinación de tasa de abatimiento de las emisiones y tasa de ahorro, que maximicen el bienestar social. El modelo *DICE-2013* presuntamente genera una medida de ese bienestar social, ante cada política sugerida.⁴²

⁴² En el Apéndice 2 se presentan los valores paramétricos del modelo de Nordhaus-Sztorc (2013).

La función de bienestar tiene una tecnología de producción Cobb-Douglas⁴³, la cual se pondera por un factor que la empequeñece; este factor es función del incremento en la temperatura media atmosférica respecto el año 1900.⁴⁴ La función de producción ajustada por daño climático se reduce un poco más por los gastos de abatimiento de emisiones de carbono.⁴⁵

Las ecuaciones de emisiones de carbono, de las masas de carbono, de fuerza radiactiva y de temperatura indican que el aumento en las emisiones industriales ocasiona aumentos en las concentraciones de carbono en los depósitos de carbono de la Tierra: atmósfera, parte superior de los océanos y profundidad de los océanos; esto hace que la fuerza radiactiva aumente y con ello, que la temperatura atmosférica y de los fondos oceánicos sea mayor.⁴⁶

Las emisiones de carbono aumentan conforme la producción bruta es mayor. La tasa de reducción de emisiones de carbono es una variable de decisión que, mientras más grande es, provoca emisiones industriales menos grandes, independientemente del nivel de producción bruta.⁴⁷ Por otra parte, mientras mayor es la tasa de reducción de emisiones de carbono, los gastos de abatimiento de emisiones también crecen. También está el hecho de que los costos de abatimiento dependen positivamente del nivel de producción bruta.⁴⁸

⁴³ Ecuación (2.2.8).

⁴⁴ Ecuaciones (2.2.15) y (2.2.16).

⁴⁵ Ecuación (2.2.18).

⁴⁶ Secciones 2.2.4 a 2.2.7.

⁴⁷ Ecuación (2.2.30).

⁴⁸ Ecuación (2.2.19).

CAPÍTULO 3. OPTIMIZACIÓN DEL TOMADOR DE DECISIONES

En este capítulo se busca la política ambiental que arroje el mayor nivel de bienestar social. Aunque uno esperaría que las variables de decisión $\mu(t)$ y $s(t)$, dado que son tasas, pudiesen tomar cualquier valor desde cero hasta 1 (es decir, desde 0% hasta 100%), no es posible hacerlo en este modelo, dado que si se sugiere una combinación de valores suficientemente grandes se obtienen valores inconmensurables en una o más variables. En otros casos menos extremos, se obtienen resultados tales como nivel de capital, de producto, de inversión, de consumo o de utilidad negativos, lo cual vuelve inconvenientes y desechables tales políticas. Este hecho condujo a una búsqueda cuidadosa de distintas políticas que no condujesen a tales escenarios.

3.1 Ocho políticas ambientales

La primera política por analizar es la del caso donde la tasa de abatimiento de las emisiones es nula, es decir, $\mu(t) = 0$ para $t = 1, 2, \dots, T_{max}$. Nordhaus-Sztorc (2013) mencionan que no conviene que la tasa de ahorro exceda, a partir de $t = 50$ el valor $s_{\text{óptimo}} = 0.258278146 \approx 25.83\%$. Para la política 1 se establece $s(t) = s_{\text{óptimo}}$ para todo t ; lo cual significa una tasa de ahorro constante y lo más alta posible.

La segunda política consiste en una tasa de abatimiento constante en el tiempo, tal que sea lo más grande posible, sin incurrir en resultados absurdos. Este nivel resulta ser $\mu(t) = 1.83\%$ para todo t . Por su parte, la tasa de ahorro se fija en $s_{\text{óptimo}}$.

La tercera política consiste en $s(t) = s_{\text{óptimo}}$ constante y una tasa de abatimiento linealmente creciente sobre t , de modo que tanto la intersección con el origen como la pendiente fuesen lo más grandes posible, sin conducir a valores erróneos, lo cual en concreto significa:

$$\mu(t) = \mu(1) + 0.0011 \cdot t = 0.009 + 0.0011 \cdot t$$

La cuarta política consiste en elegir un conjunto de pares $(\mu(t), s(t))$ distinto para cada $t = 1, 2, \dots, T_{max}$, donde $0 \leq \mu(t) \leq 0.0183$ y $0 \leq s(t) \leq 0.258278146$ y dicho conjunto es tal que se obtiene el mayor nivel de bienestar social, de un total de 10 mil

conjuntos de valores generados aleatoriamente en Excel entre los límites señalados. Obviamente una política como esta (radicalmente fluctuante) es con creces más irreal que una constante o creciente.

La quinta política consiste en elegir un conjunto de pares $(\mu(t), s(t))$ distinto para cada $t = 1, 2, \dots, T_{max}$, donde $0 \leq \mu(t) \leq 0.009 + 0.0011 \cdot t$ y $0 \leq s(t) \leq 0.258278146$ y dicho conjunto es tal que se obtiene el mayor nivel de bienestar social, de un total de 10 mil conjuntos de valores generados aleatoriamente en Excel entre los límites señalados. Es otro caso de política fluctuante y por ende poco interesante.

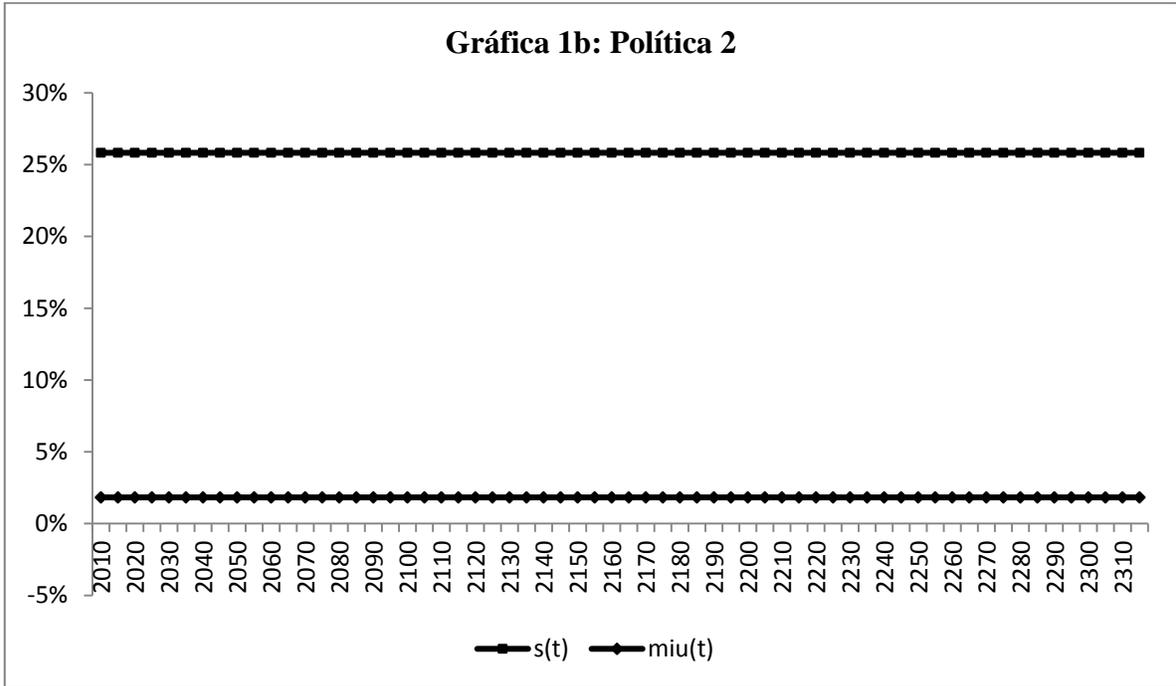
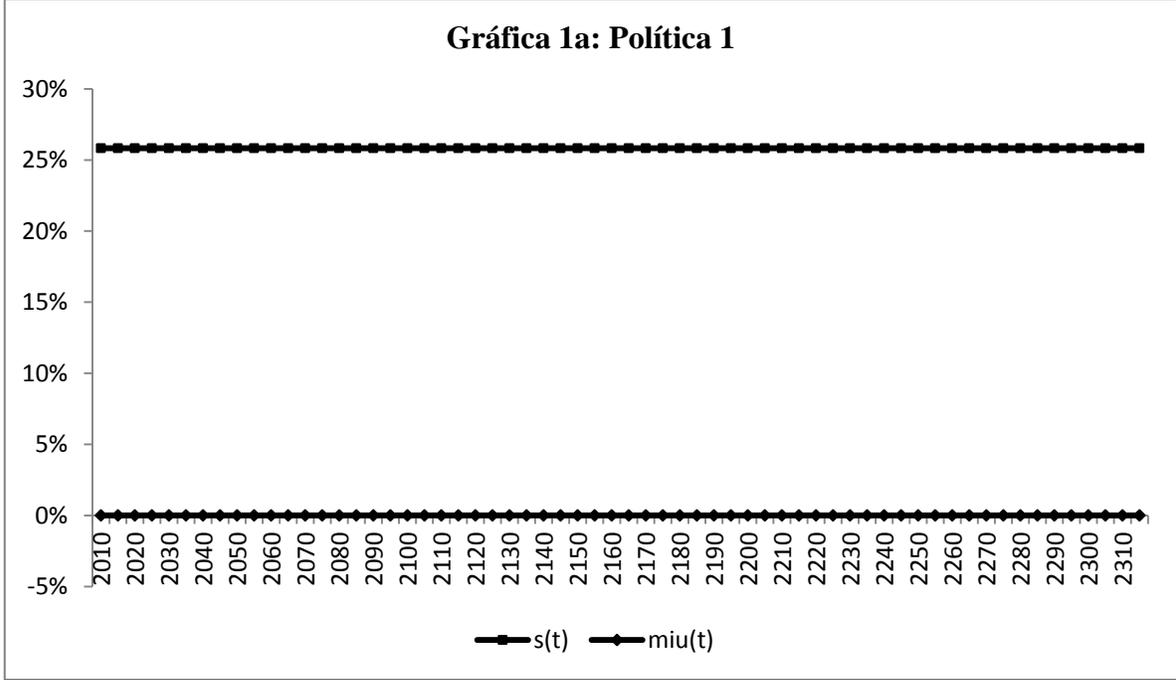
La sexta política consiste en elegir un par $(\mu(t), s(t))$ constante, esto es $\mu(1) = \mu(2) = \dots = \mu(T_{max})$ y $s(1) = s(2) = \dots = s(T_{max})$, donde dicho par es tal que se obtiene el mayor nivel de bienestar social, de un total de 10 mil conjuntos de pares $0 \leq \mu(t) \leq 0.0183$ y $0 \leq s(t) \leq 0.258278146$, generados aleatoriamente en Excel. En particular, este par resultó ser (0.03%, 24.59%).

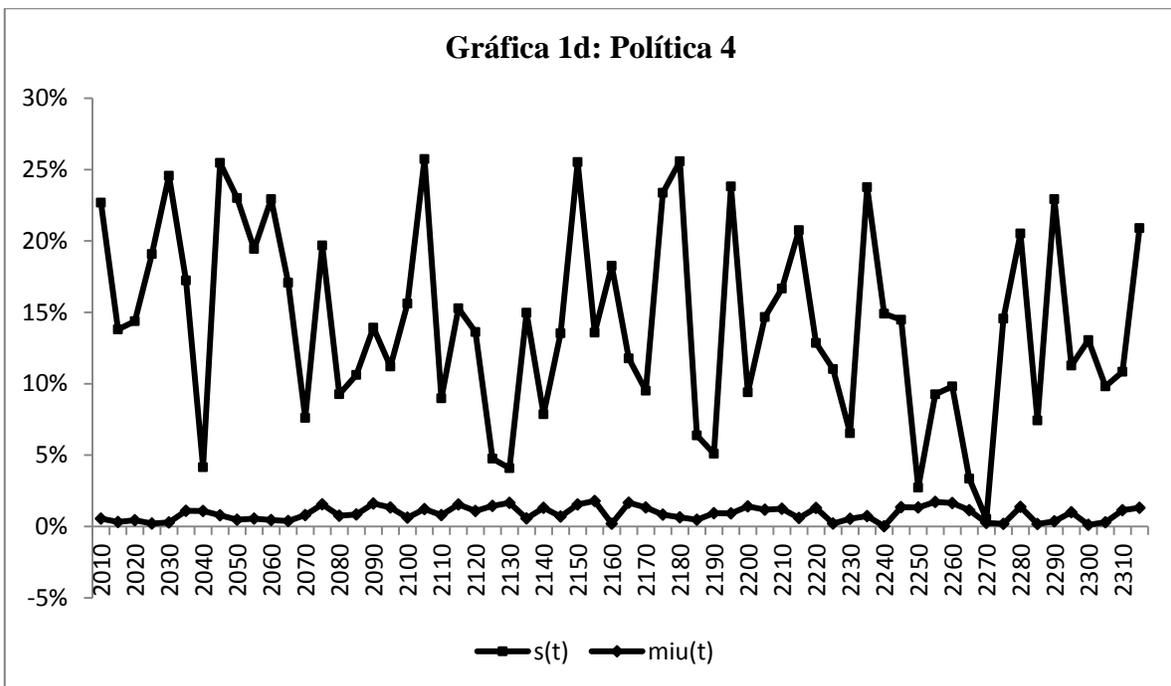
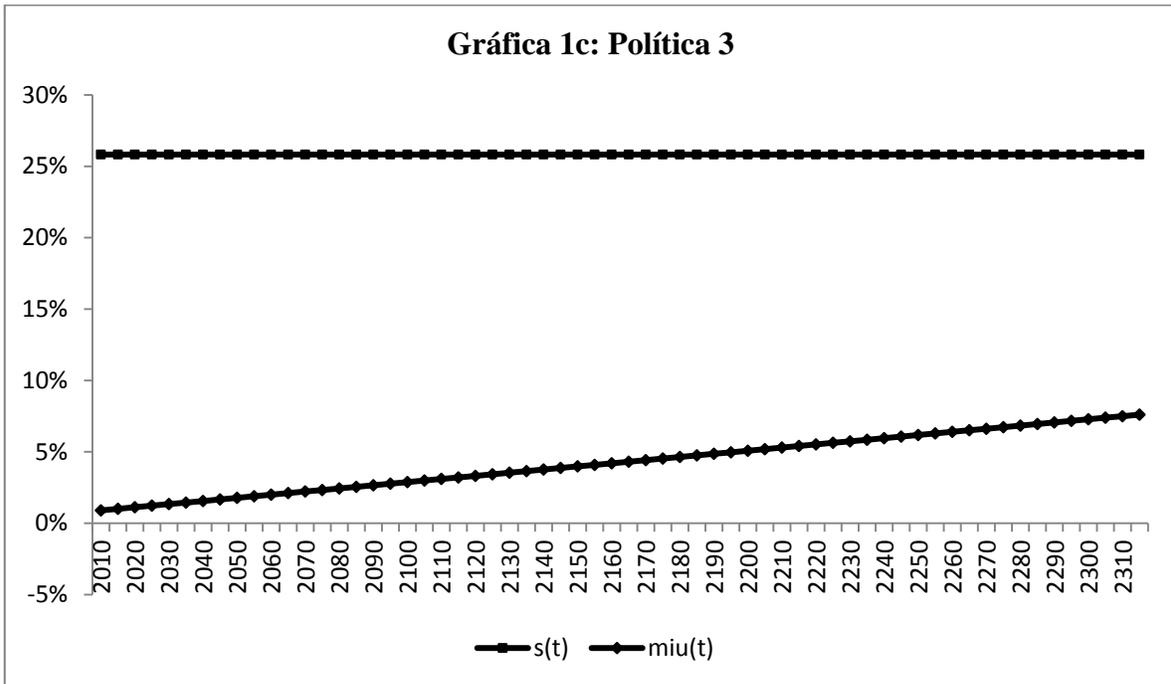
La séptima política consiste en elegir un par $(\mu(t), s(t))$, donde $\mu(t) = 1.83\%$ para cada $t = 1, 2, \dots, T_{max}$, y $0 \leq s(t) \leq 0.258278146$, donde dicho par es tal que se obtiene el mayor nivel de bienestar social, de un total de 10 mil conjuntos de valores generados aleatoriamente en Excel entre los límites señalados.

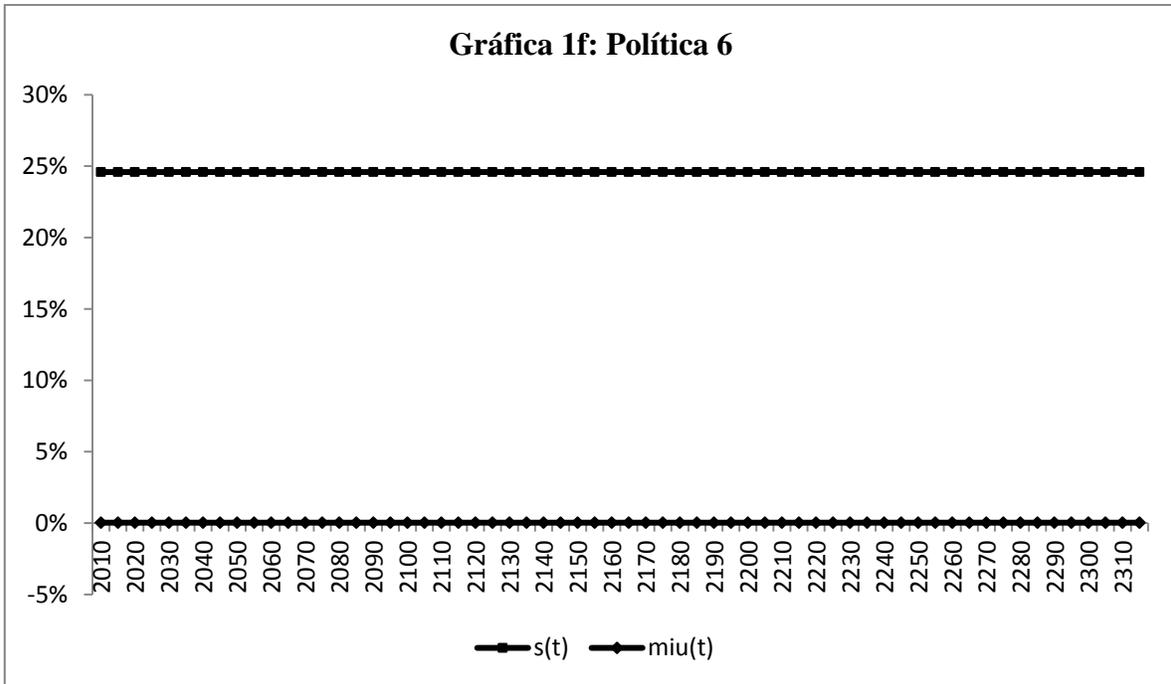
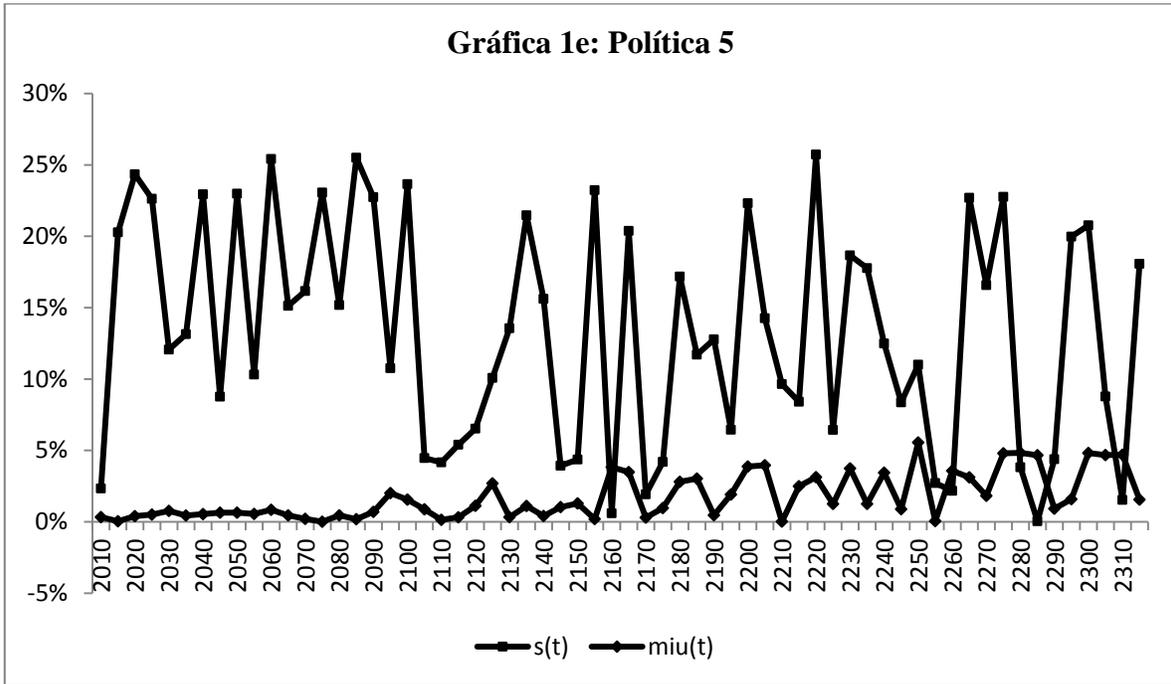
La octava política consiste en elegir un par $(\mu(t), s(t))$, donde $\mu(t) = 1.83\%$ para cada $t = 1, 2, \dots, T_{max}$, y $0 \leq s(1) = s(2) = \dots = s(T_{max}) \leq 0.258278146$, donde dicho par es tal que se obtiene el mayor nivel de bienestar social, de un total de 10 mil conjuntos de pares generados aleatoriamente en Excel entre los límites señalados. En particular, este par resultó ser (1.83%, 19.12%).

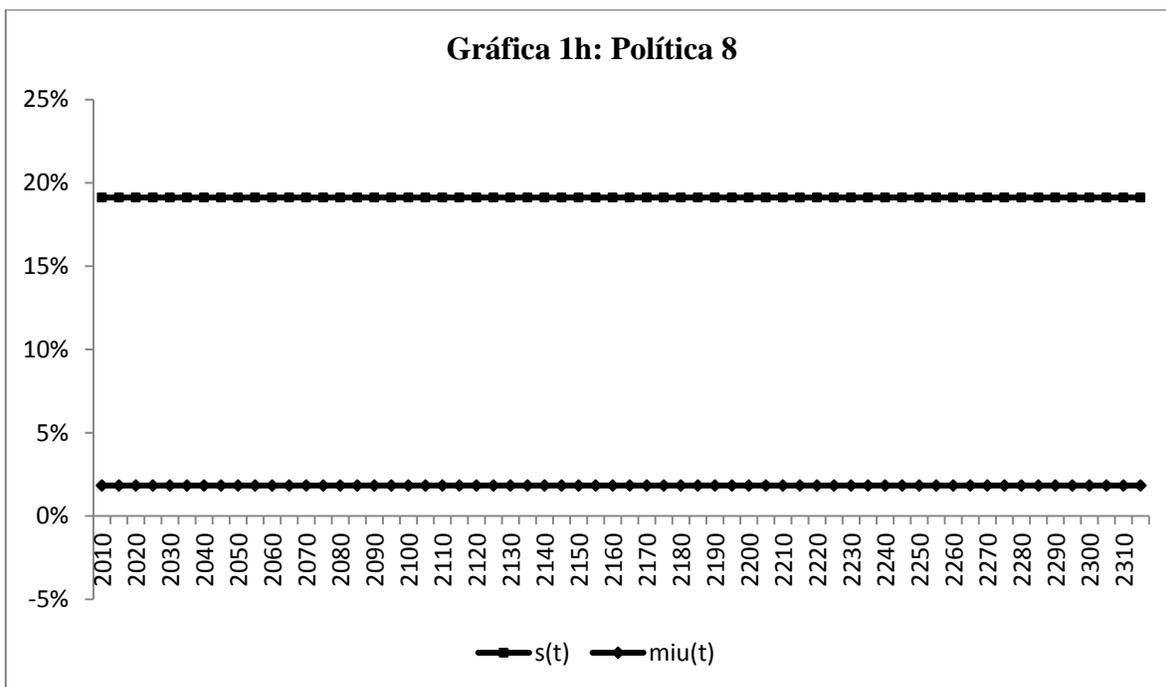
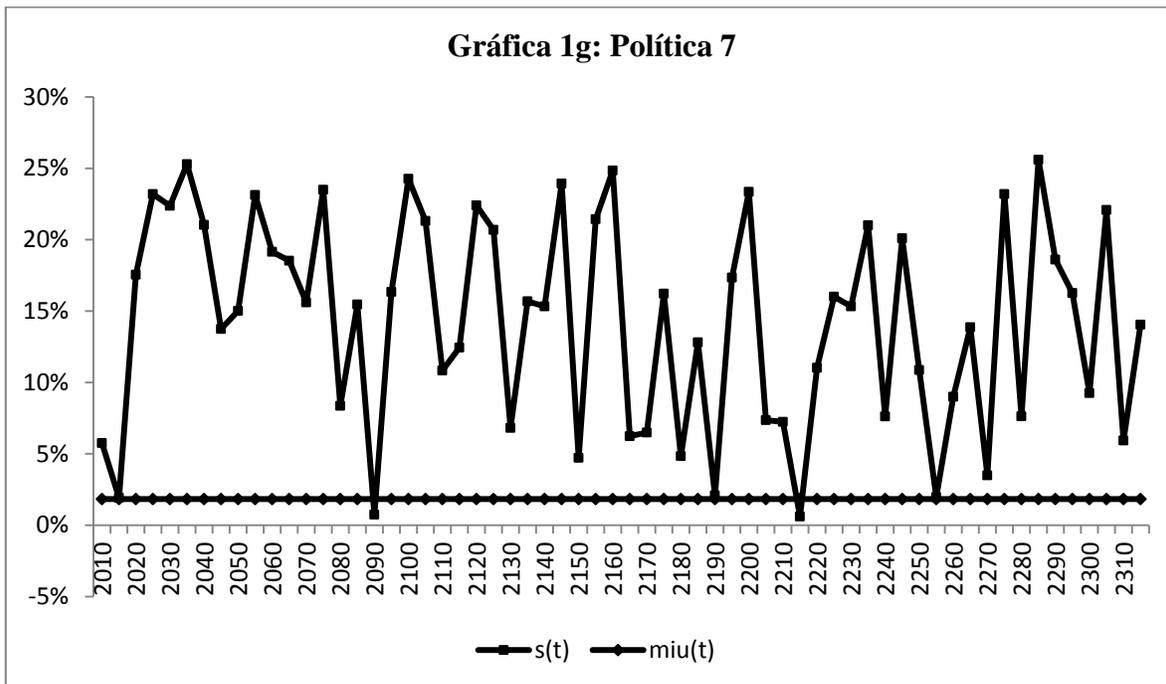
El cuadro 1 resume lo antedicho. Ver gráficas 1 a 8.

Cuadro 1: Políticas comparadas		
	$\mu(t)$	$s(t)$
Política 1	Fija en cero	Fija en 0.258278146
Política 2	Fija en 1.83%	Fija en 0.258278146
Política 3	$\mu(t) = 0.0090 + 0.0011 \cdot t$	Fija en 0.258278146
Política 4	Variable entre 0 y 1.83%	Variable entre 0 y 0.258278146
Política 5	Variable entre 0 y $0.009 + 0.0011 \cdot t$	Variable entre 0 y 0.258278146
Política 6	Fija en 0.03%	Fija en 24.59%
Política 7	Fija en 1.83%	Variable entre 0 y 0.258278146
Política 8	Fija en 1.83%	Fija en 19.12%









En las gráficas 1a a 1h se aprecia que la tasa de ahorro no puede ir mucho más allá de 25%. Por su parte, la tasa de abatimiento está mucho más limitada pues no puede sobrepasar 1.83% en el caso constante, o de $\mu(1) = 0.90\%$ a $\mu(60) = 7\%$ en el caso creciente.

3.2 Resultados

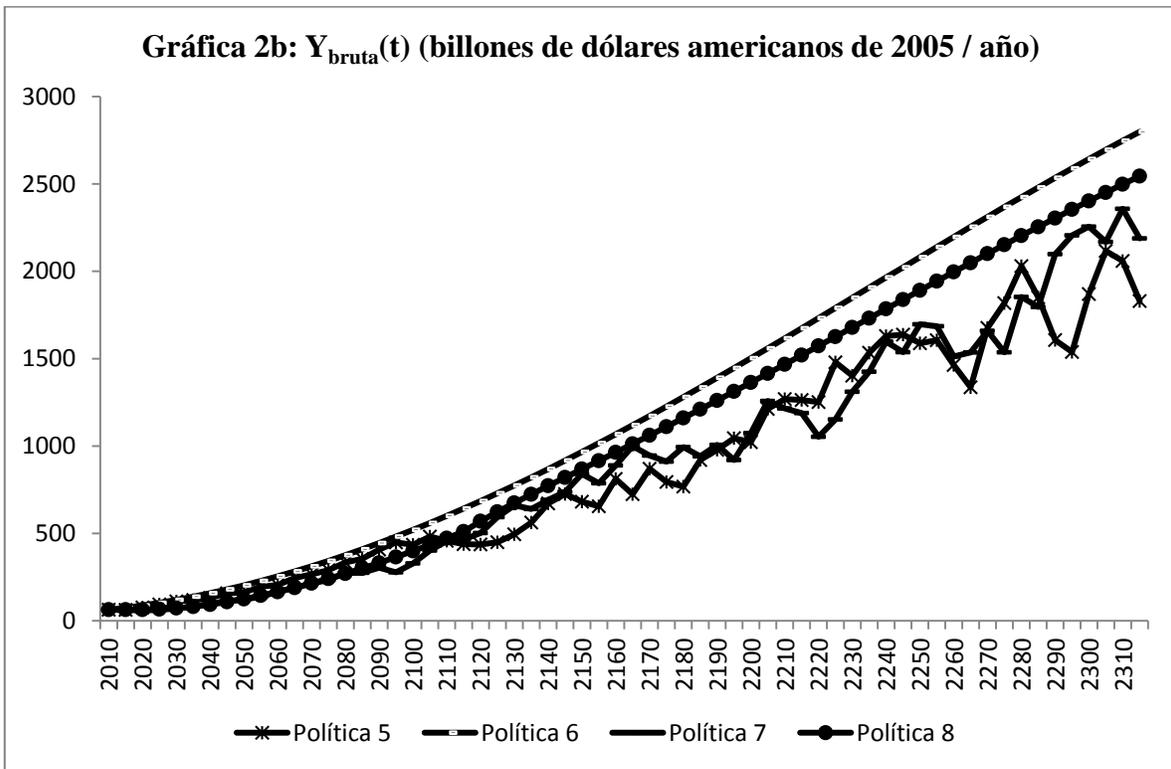
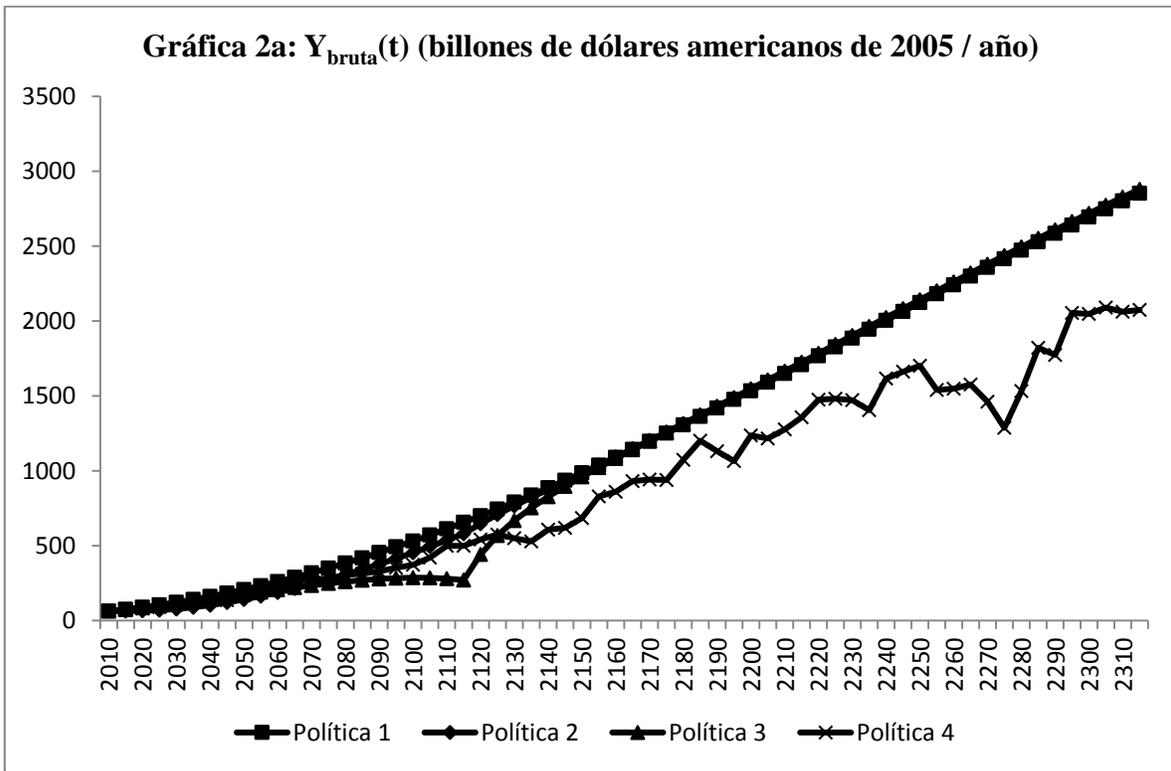
En esta sección se presentan los niveles de producto bruto, producto ajustado por daño climático y costo de abatimiento, inversión, capital, consumo; masas de carbono y temperatura y por último bienestar social.

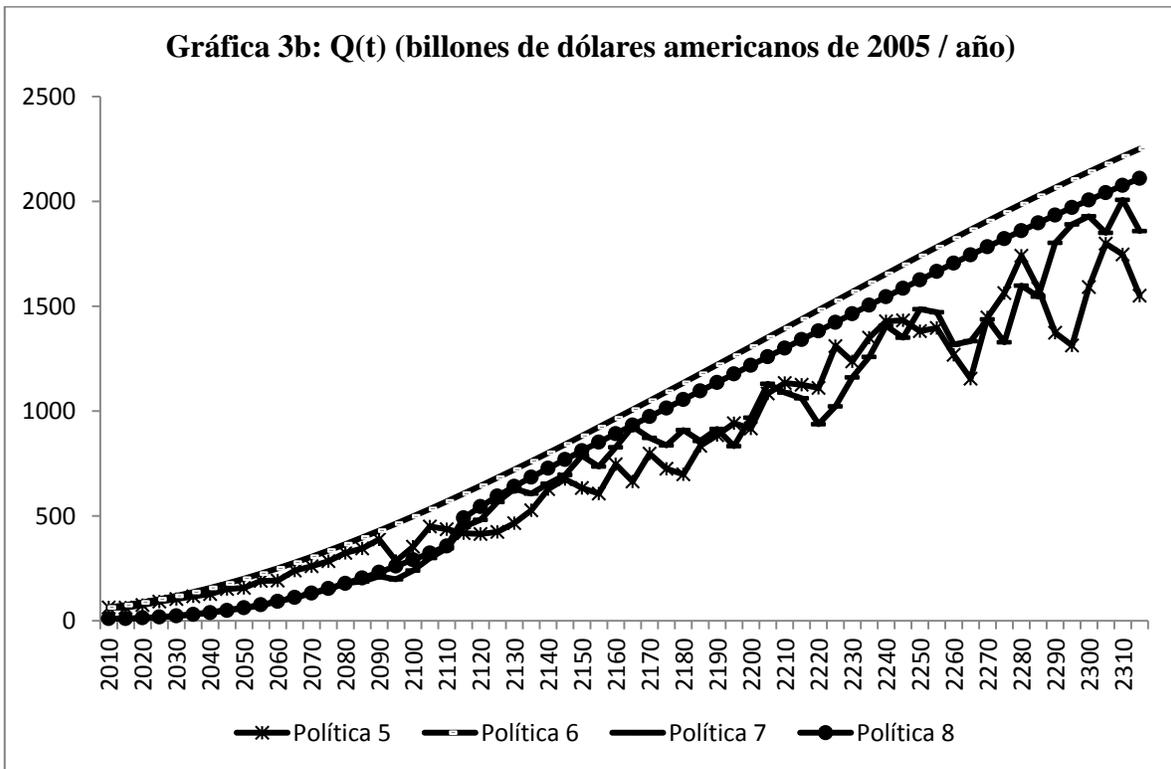
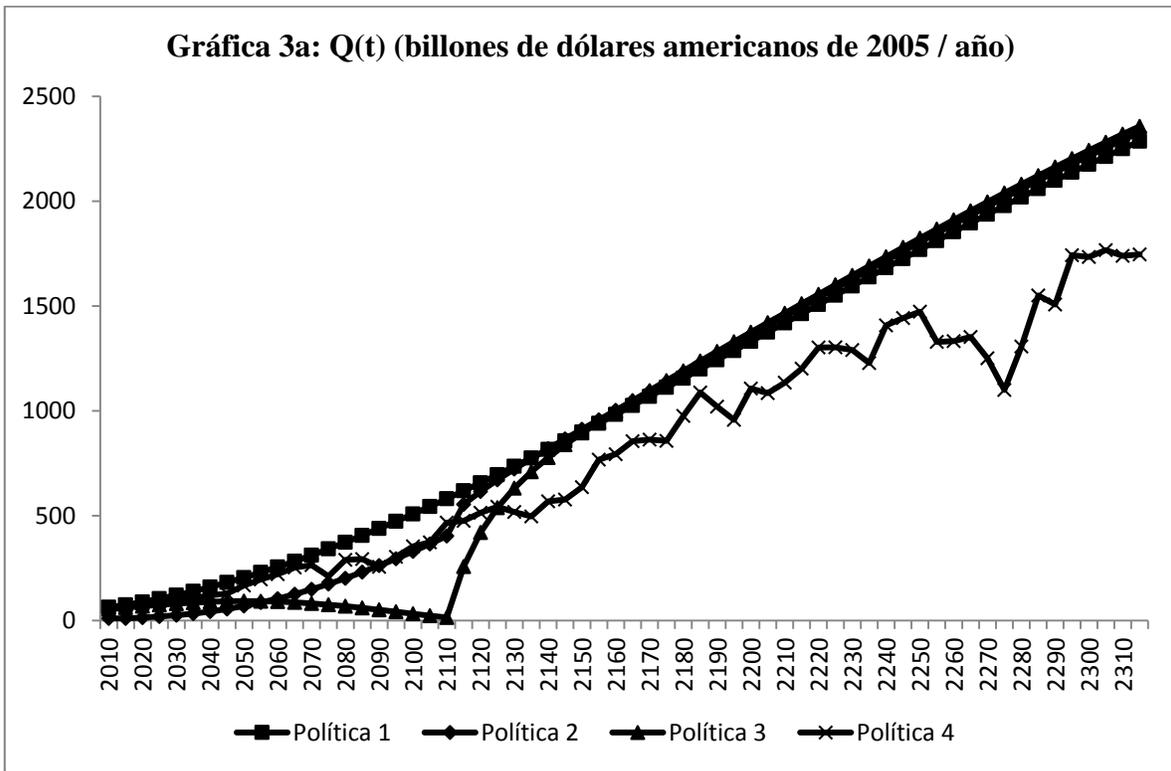
3.2.1 Producto bruto, producto ajustado por daño climático y costo de abatimiento, inversión, capital y consumo

En las gráficas 2a, 2b, 3a, 3b, 4a, 4b, 5a, 5b, 6a y 6b y en los cuadros 2, A1, A2, A3, A4 y A5, puede verse que las políticas donde varía la tasa de ahorro (política 7), o varían la tasa de ahorro y la de abatimiento (políticas 4 y 5), producen trayectorias para $Y_{bruta}(t)$, $Q(t)$, $I(t)$, $K(t)$ y $C(t)$ que oscilan. La política 3, donde la tasa de ahorro es fija y la tasa de abatimiento es linealmente creciente, hace que $Y_{bruta}(t)$, $Q(t)$, $I(t)$, $K(t)$ y $C(t)$ presenten un pico inferior en el año 2110. Además es claro que las políticas donde las variables de decisión no son constantes, conducen a niveles inferiores para tales variables económicas. La inestabilidad en estas variables y los bajos niveles que alcanzan, constituyen dos evidentes inconvenientes desde el punto de vista netamente económico, por aplicar políticas donde $s(t)$ y $\mu(t)$ no sean constantes.⁴⁹

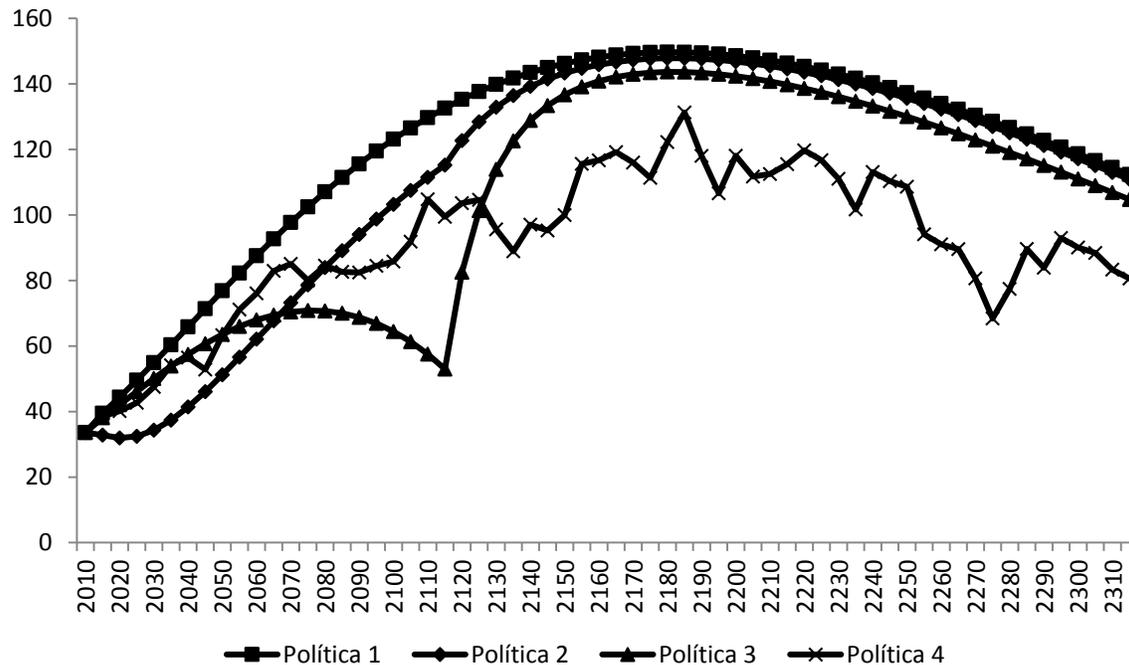
Cuadro 2: Promedios de producto bruto, producto ajustado por daño climático y costo de abatimiento, inversión, capital y consumo					
	$Y_{bruta}(t)$	$Q(t)$	$I(t)$	$K(t)$	$C(t)$
Política 1	1,238.71	1,060.20	273.83	3,071.39	786.37
Política 2	1,220.79	1,029.46	265.89	2,969.25	763.57
Política 3	1,196.42	998.65	257.93	2,868.70	740.72
Política 4	922.22	812.41	107.47	1,190.02	704.94
Política 5	890.74	787.52	94.38	1,065.83	693.14
Política 6	1,214.35	1,042.23	256.28	2,874.53	785.95
Política 7	917.49	795.25	105.00	1,169.44	690.25
Política 8	1,080.29	924.70	176.79	1,974.47	747.91

⁴⁹ Aunque ya de por sí, como se dijo anteriormente, las políticas donde las variables de decisión no son constantes, son más irreales.

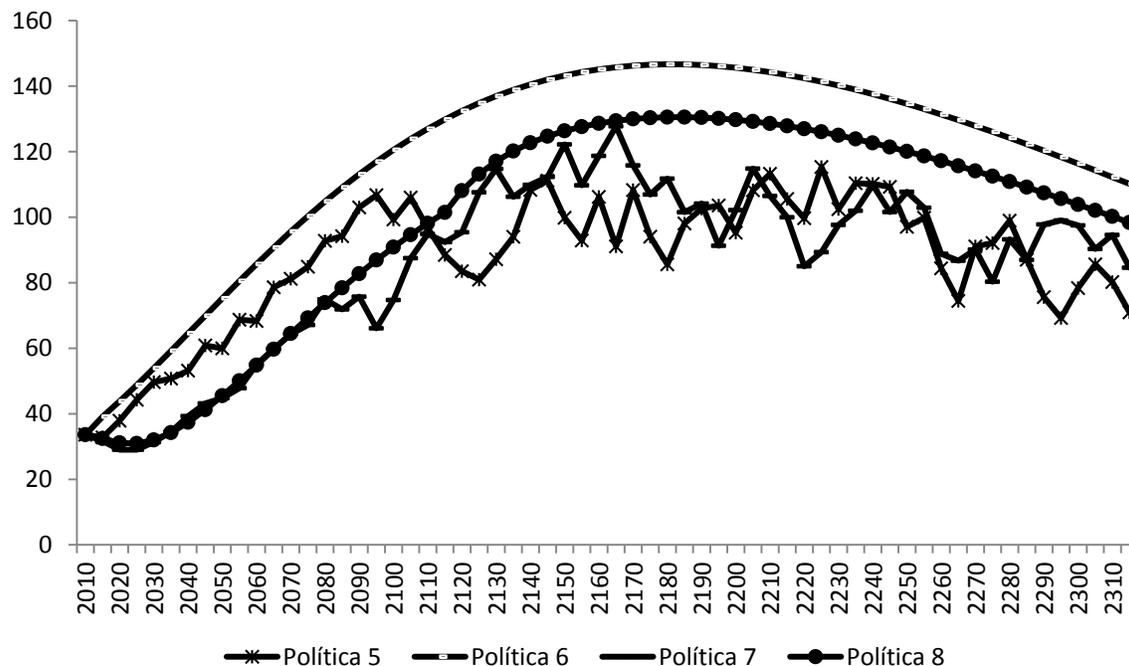


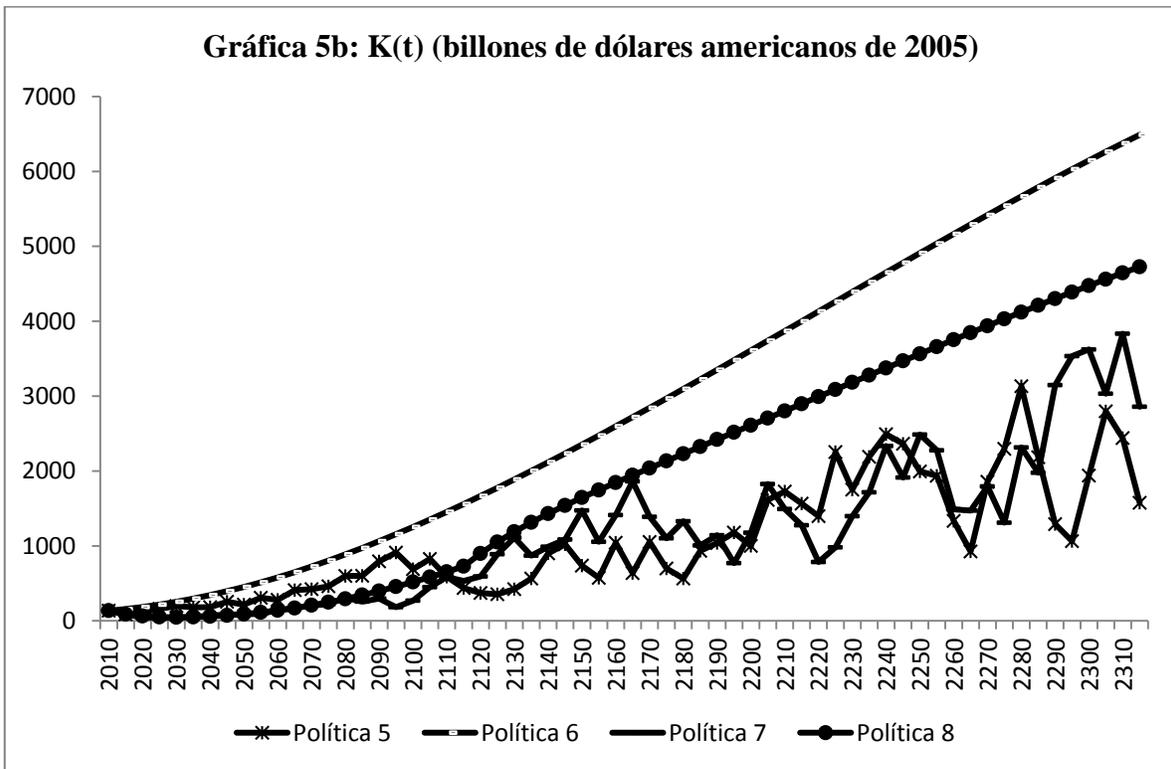
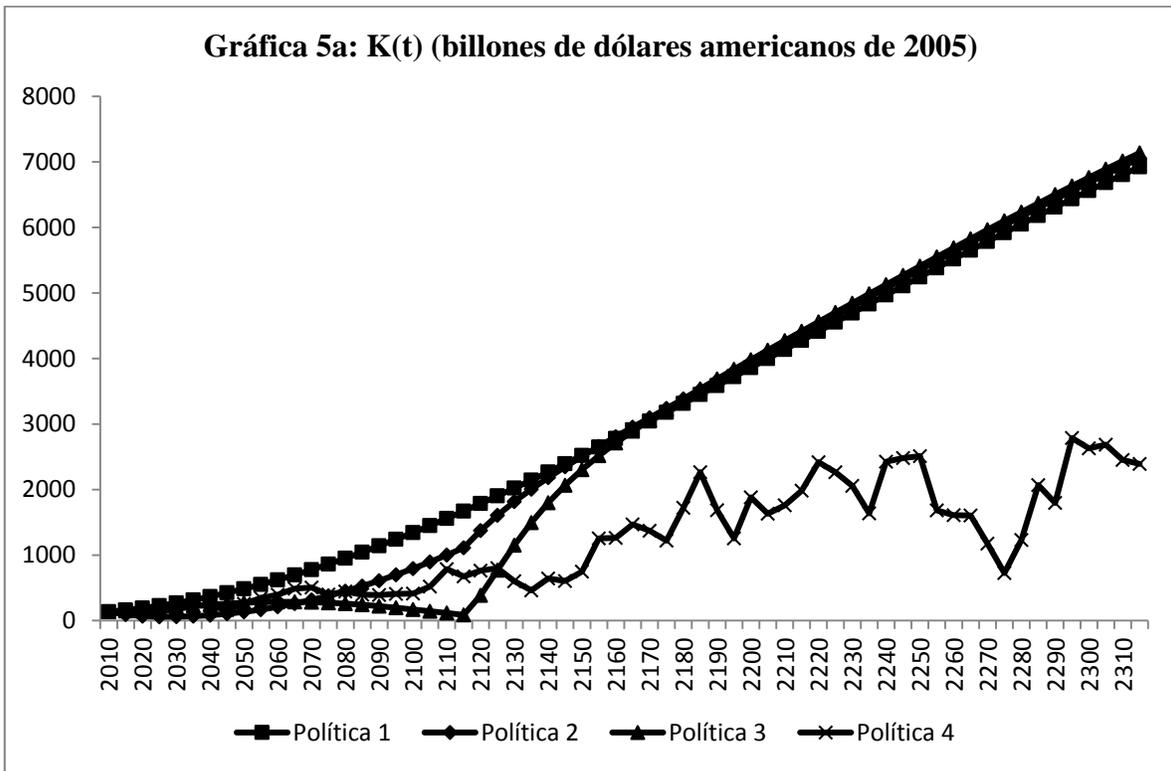


Gráfica 4a: I(t) (billones de dólares americanos de 2005 / año)

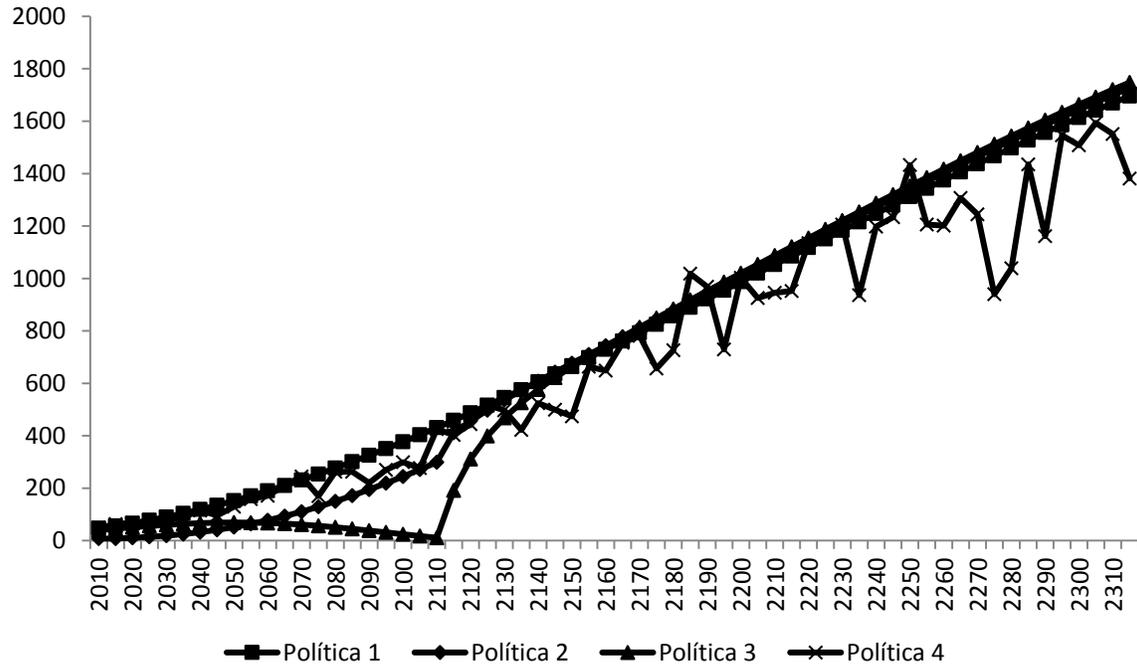


Gráfica 4b: I(t) (billones de dólares americanos de 2005 / año)

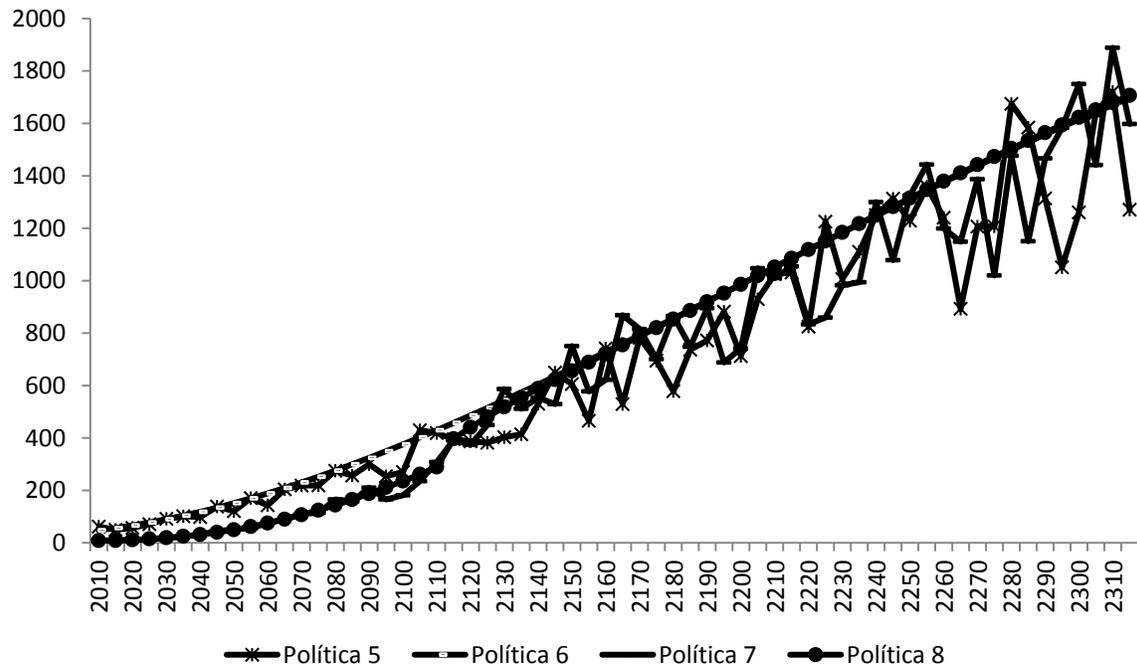




Gráfica 6a: C(t) (billones de dólares americanos de 2005 / año)



Gráfica 6b: C(t) (billones de dólares americanos de 2005 / año)

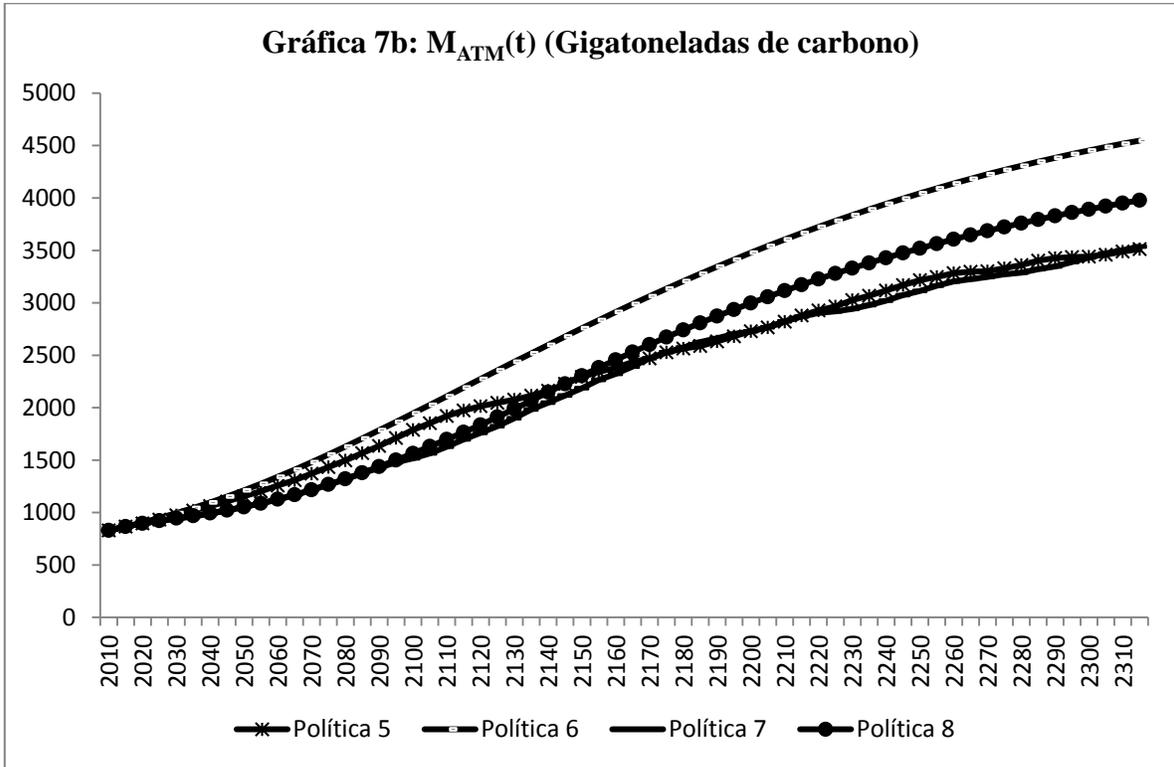
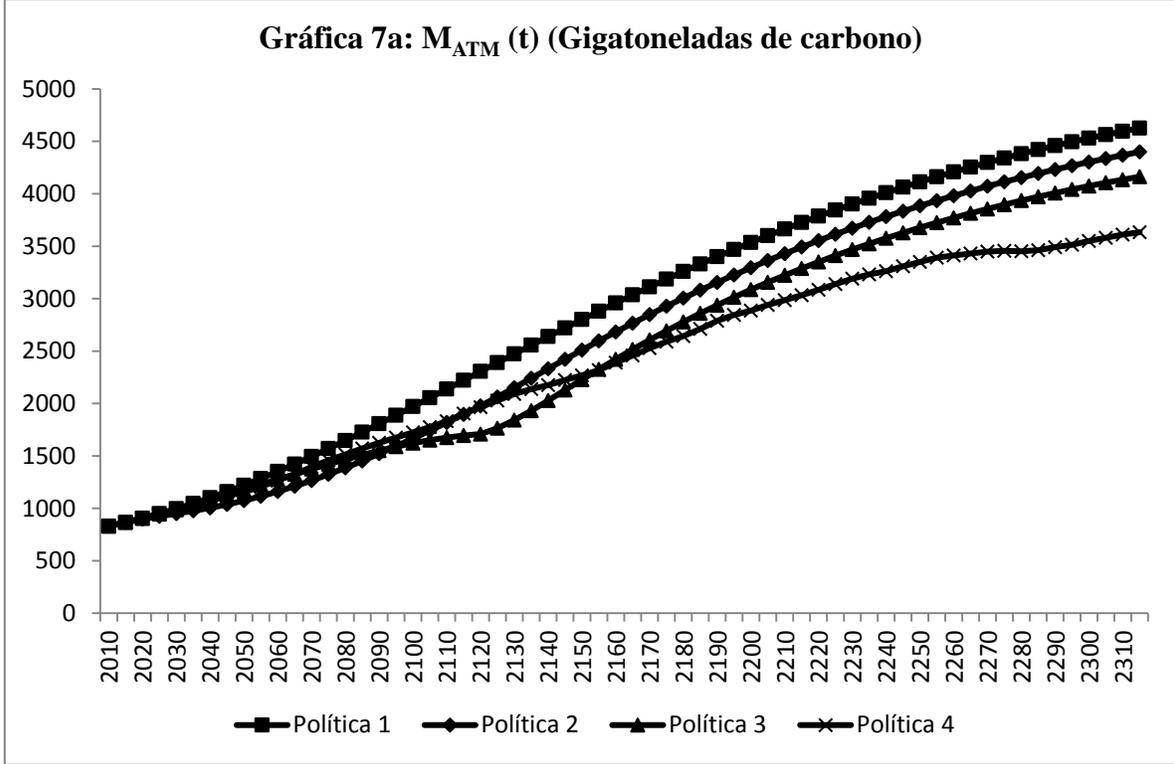


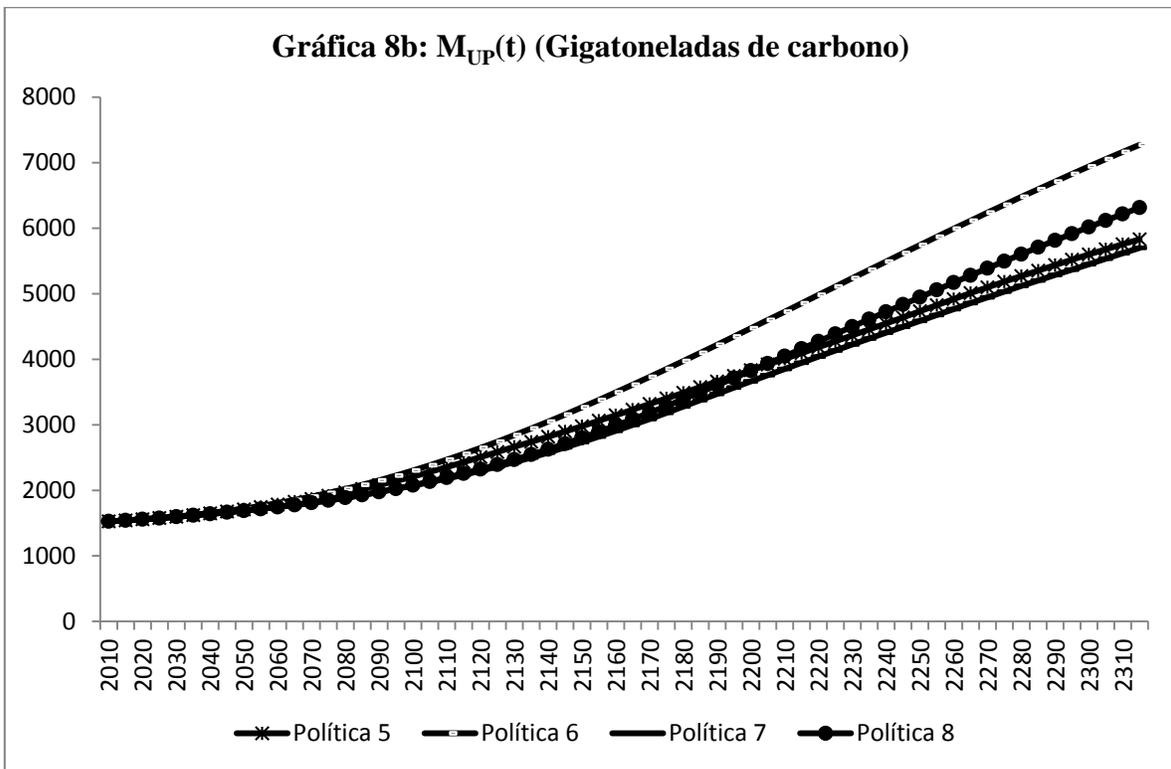
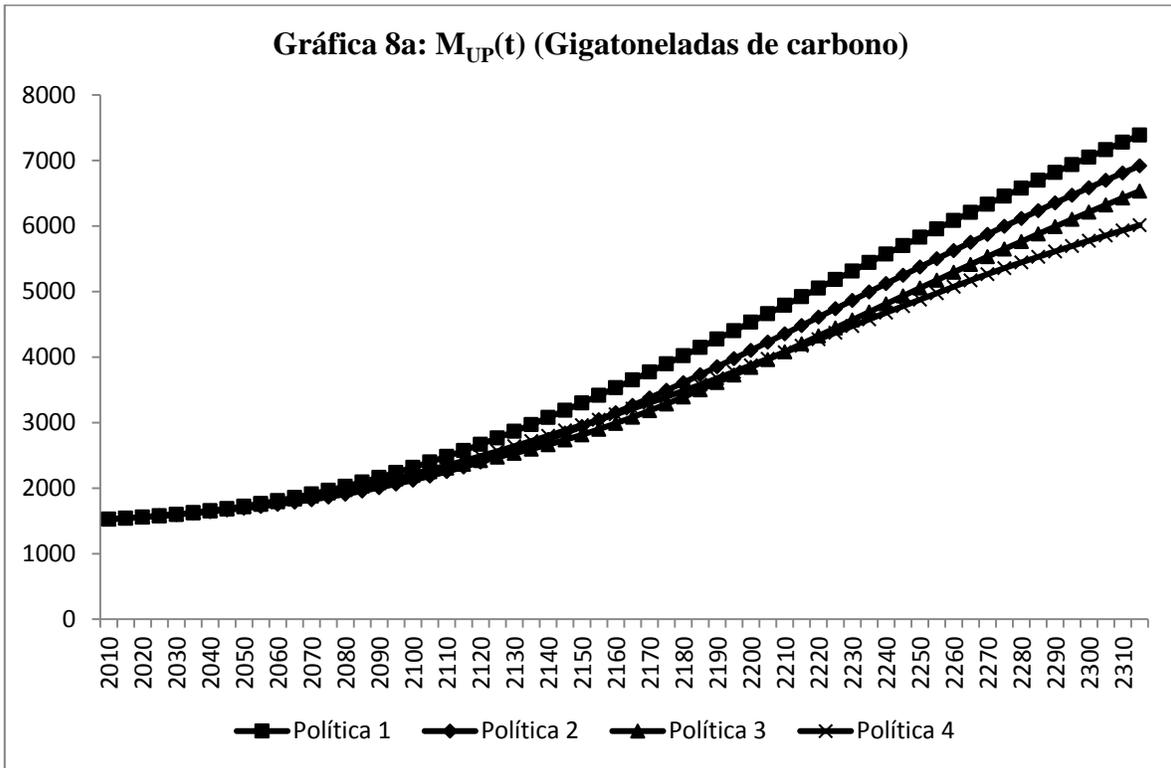
3.2.2 Masas de carbono y temperatura

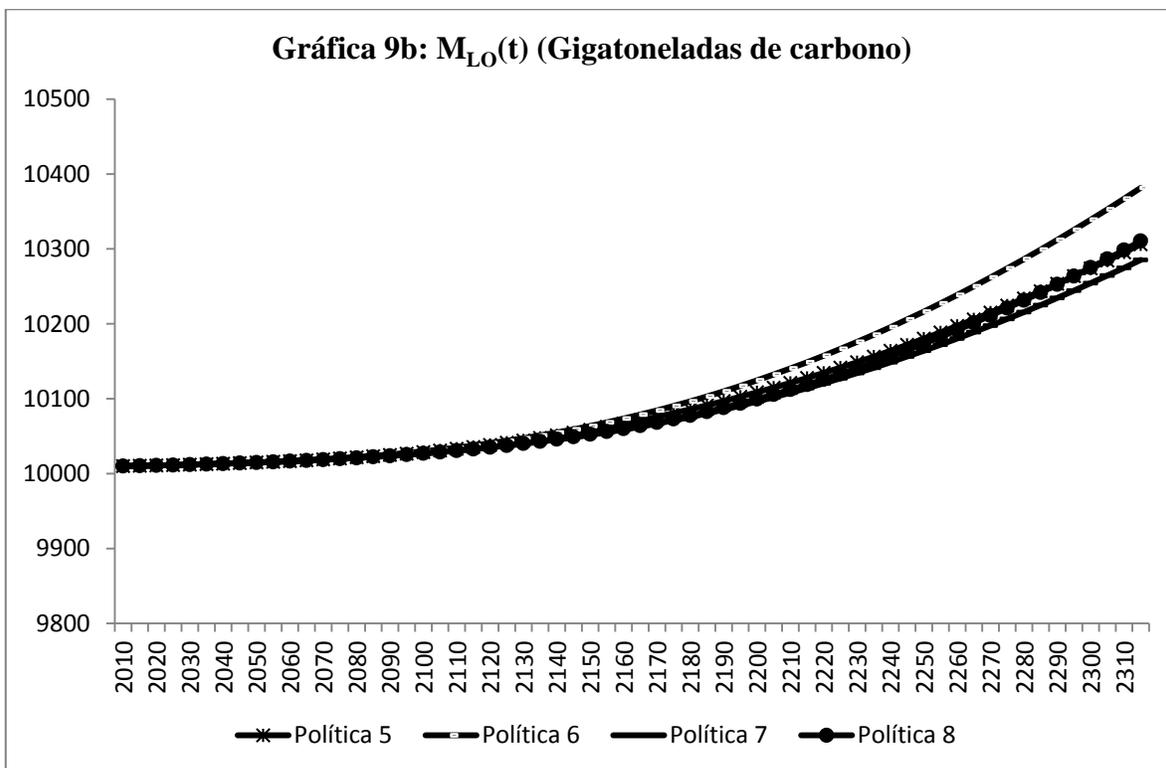
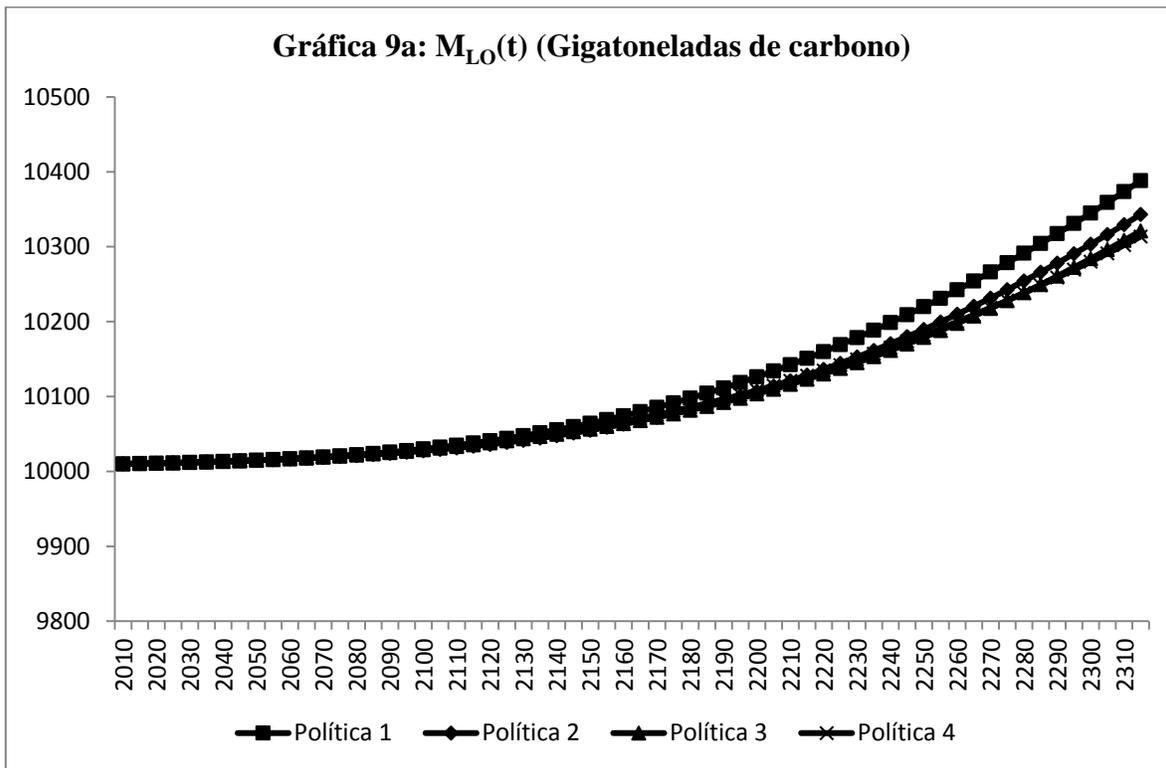
En las gráficas 7a, 7b, 8a, 8b, 9a, 9b, 10a, 10b, 11a y 11b y en los cuadros 3, A6, A7, A8, A9 y A10, puede verse que las políticas donde varía la tasa de ahorro, o la de abatimiento, o ambas, conducen a menores niveles de masas de carbono y temperaturas en comparación con las políticas fijas. Esto constituye un pro desde el punto de vista ambiental, por aplicar políticas donde $s(t)$ y $\mu(t)$ no sean constantes.

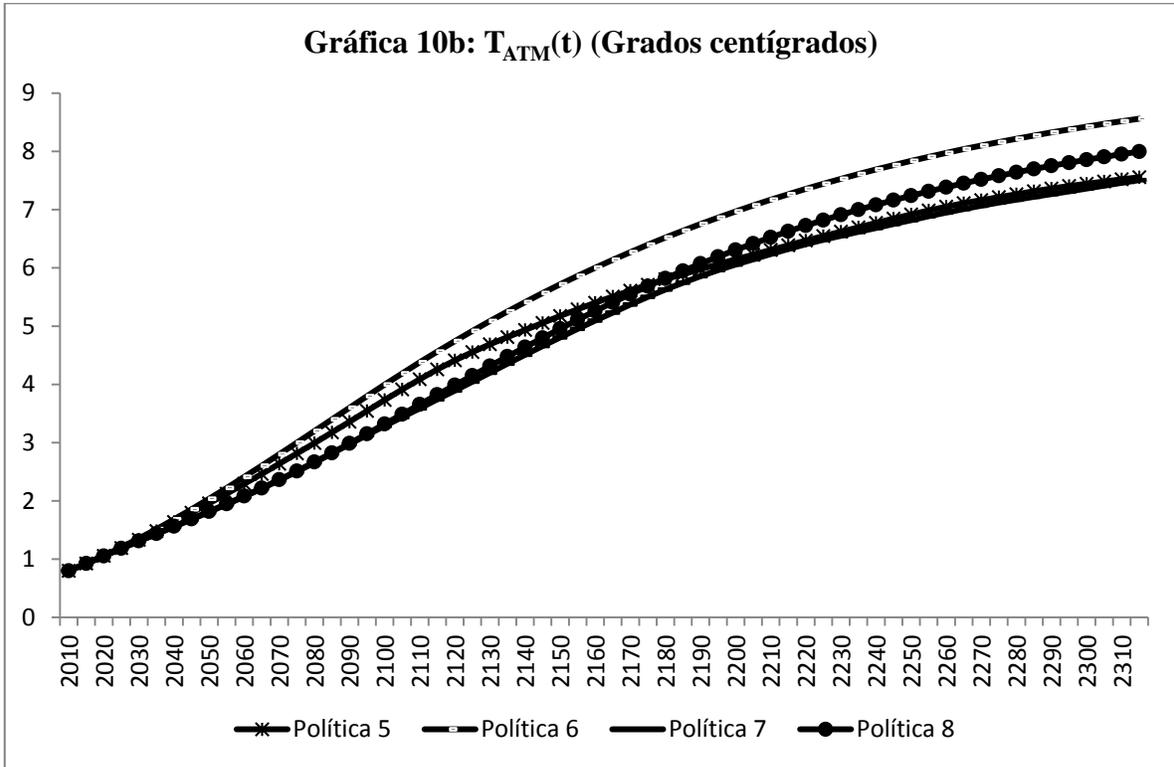
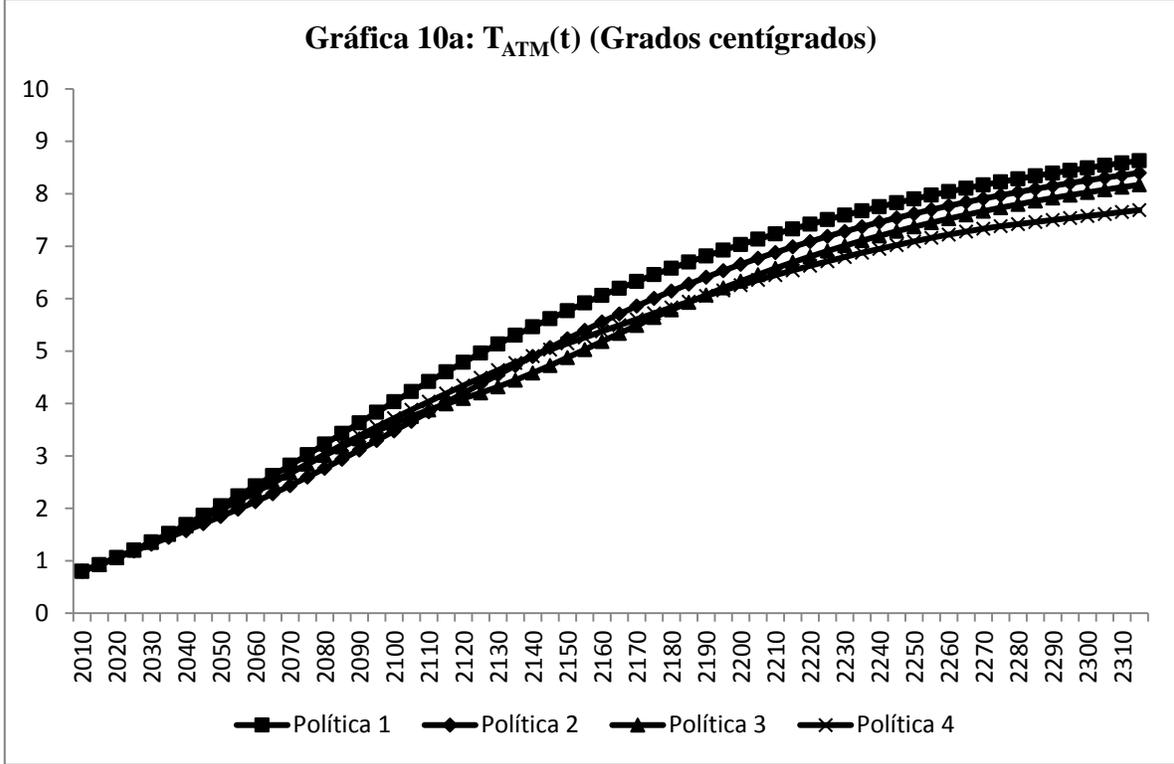
Por otra parte, todas las políticas conducen inevitablemente a un aumento de las masas de carbono y de las temperaturas. Por ejemplo, en el año 2010 la masa de carbono atmosférico se estimó en 830.4 gigatoneladas de carbono; en el año 2310, según el modelo, ésta será de 4,594.94 gigatoneladas de carbono, lo que significa un aumento de 553.34%. La temperatura de los océanos inferiores va de aproximadamente 0.01 °C en 2010 hasta aproximadamente 5 °C en el año 2310, lo cual representa un alarmante crecimiento de 73,525.61%. Los cuadros 4a y 4b muestran los aumentos porcentuales por política para las variables susodichas.

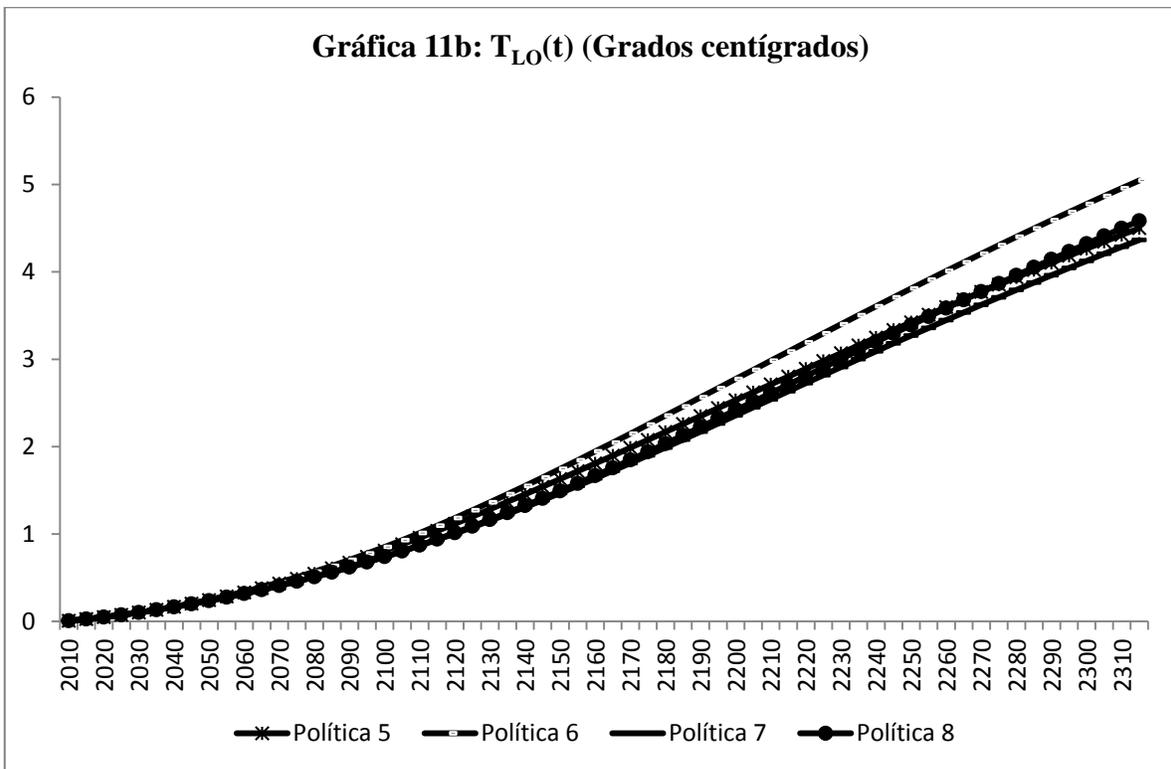
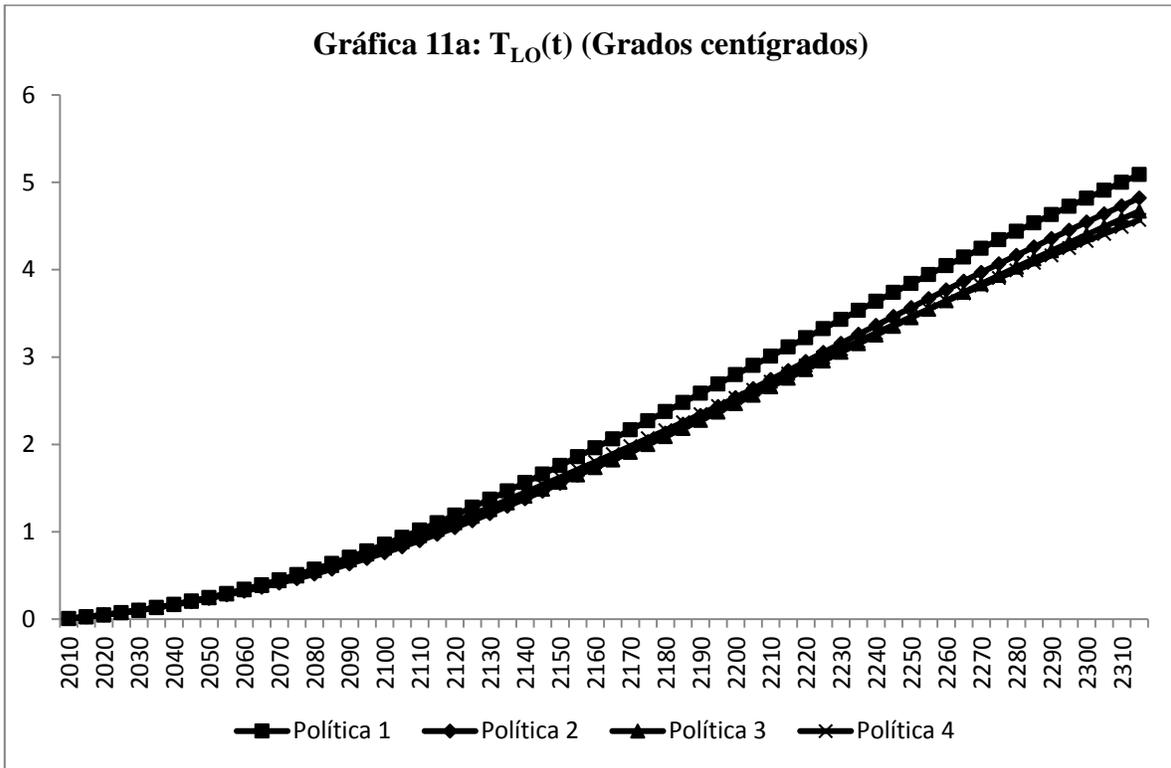
Cuadro 3: Promedios de masas de carbono y temperaturas					
	$M_{ATM}(t)$	$M_{UP}(t)$	$M_{LO}(t)$	$T_{ATM}(t)$	$T_{LO}(t)$
Política 1	2,865.89	3,902.49	10,120.81	5.53	2.19
Política 2	2,640.65	3,602.20	10,105.21	5.18	2.02
Política 3	2,499.70	3,453.19	10,100.81	5.04	1.98
Política 4	2,373.65	3,396.79	10,101.88	4.98	1.99
Política 5	2,315.97	3,345.90	10,100.78	4.92	1.98
Política 6	2,823.40	3,857.31	10,119.04	5.48	2.17
Política 7	2,229.61	3,208.59	10,092.11	4.73	1.86
Política 8	2,425.11	3,381.54	10,097.14	4.93	1.92











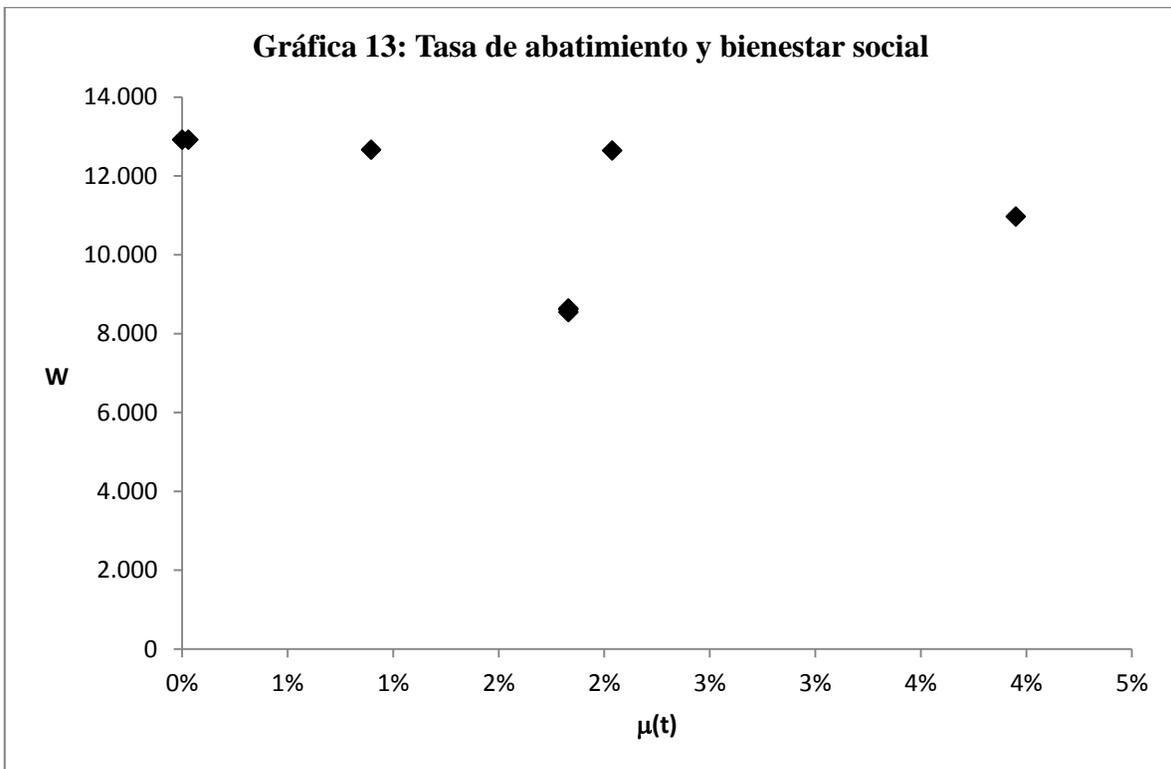
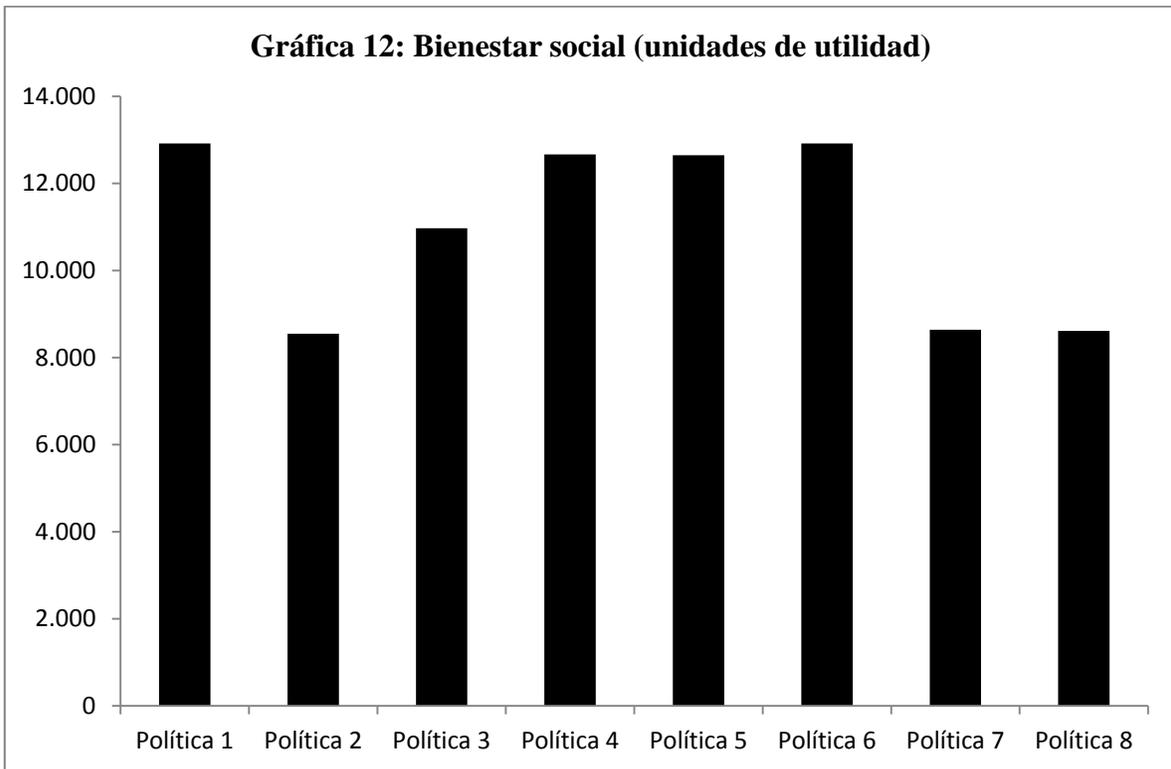
Cuadro 4a: Aumentos porcentuales en un horizonte de 300 años				
Variable	Política 1	Política 2	Política 3	Política 4
$M_{ATM}(t)$	553.34%	526.08%	497.88%	434.84%
$M_{UP}(t)$	476.53%	445.92%	420.92%	388.58%
$M_{LO}(t)$	103.63%	103.19%	102.98%	102.92%
$T_{ATM}(t)$	1,073.21%	1,044.19%	1,015.71%	956.51%
$T_{LO}(t)$	73,525.61%	69,555.96%	67,369.51%	66,029.41%

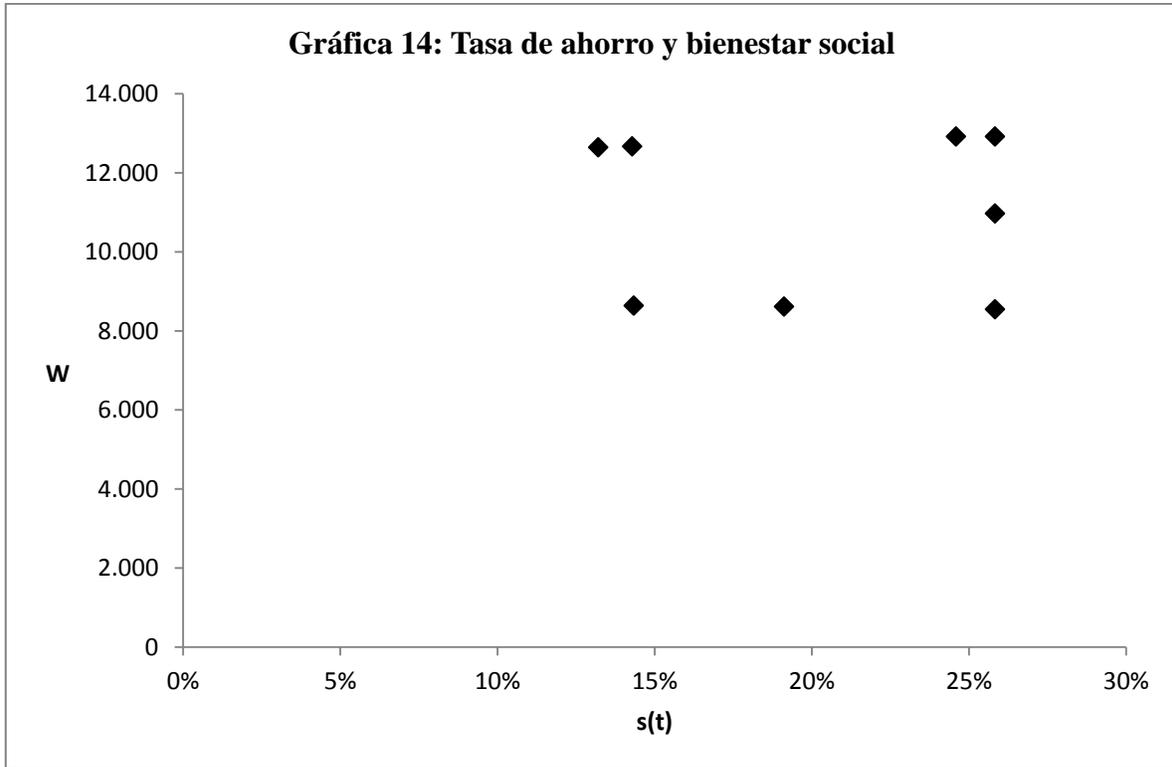
Cuadro 4b: Aumentos porcentuales en un horizonte de 300 años				
Variable	Política 5	Política 6	Política 7	Política 8
$M_{ATM}(t)$	420.16%	544.02%	421.58%	475.73%
$M_{UP}(t)$	376.85%	469.12%	367.81%	407.12%
$M_{LO}(t)$	102.85%	103.57%	102.65%	102.88%
$T_{ATM}(t)$	939.94%	1,064.69%	932.48%	994.02%
$T_{LO}(t)$	65,055.11%	72,916.01%	63,047.10%	66,153.10%

3.2.3 Bienestar social

En las gráficas 12, 13 y 14 y en el cuadro 5 no se aprecia gran cosa a simple vista; sin embargo, el coeficiente de correlación de $s(t)$ y W es de 0.36% y el coeficiente de correlación de $\mu(t)$ y W es de -44.64%. Lo primero indica que prácticamente no hay correlación entre la tasa de ahorro y el nivel de bienestar social; o bien, si consideramos que la hay, es positiva y muy pequeña. Por su parte, lo segundo indica que, mientras la tasa de abatimiento se incrementa en una unidad porcentual, el beneficio social proyectado para los próximos 300 años habrá de decrecer en casi 45% según este modelo.

Cuadro 5: Bienestar social			
	$s(t)$ promedio	$\mu(t)$ promedio	W
Política 1	25.83%	0.00%	12,917.99
Política 2	25.83%	1.83%	8,547.20
Política 3	25.83%	3.95%	10,970.21
Política 4	14.28%	0.90%	12,667.34
Política 5	13.20%	2.04%	12,646.92
Política 6	24.59%	0.03%	12,919.67
Política 7	14.34%	1.83%	8,638.44
Política 8	19.12%	1.83%	8,614.12





Finalmente, puede decirse que la mejor política es la 6, que establece niveles fijos para las variables de decisión: $\mu(t) = 0.03\%$ y $s(t) = 24.59\%$, lo cual nos da un beneficio social de 12,919.67 unidades de utilidad. Es notorio que la tasa de abatimiento es pequeña y la tasa de ahorro es más bien grande. Las trayectorias que esta política proyecta para las variables de producto, inversión, capital y consumo son grandes y estables en comparación con las trayectorias que describen otras políticas. No obstante, los valores que toman las variables de masa de carbono atmosférico, masa de carbono de los océanos superiores e inferiores y los niveles de temperatura atmosférica y del fondo de los océanos también son grandes en comparación con el resto de las políticas.

CONCLUSIONES

Se ha mostrado cómo el modelo de análisis integrado, *DICE-2013* de Nordhaus y Sztorc, simula la trayectoria de una economía con tecnología Cobb-Douglas y evalúa el bienestar social aplicando una función de aversión relativa al riesgo constante. Esta función se adapta de modo que, presuntamente, se han de retratar dos fenómenos: 1) La reducción del bienestar conforme los niveles de masas de carbono y consecuentemente, temperaturas, aumentan y 2) que al implementar una política de abatimiento de las emisiones de carbono, se incurre en un costo.

Como se dijo anteriormente, la hipótesis de esta investigación es: “Si se utiliza el modelo Dinámico Integrado de Clima y Economía, *DICE-2013*, de Nordhaus y Sztorc (2013), para evaluar cada una de las políticas ambientales para la reducción de emisiones de gases efecto invernadero, en concreto, carbono atmosférico, de entre un grupo de políticas disponibles, se logra identificar, de entre todas ellas, cuál es la alternativa más conveniente desde el punto de vista económico actual, que toma en cuenta la importancia del medio ambiente.” Por lo que se pudo ver, el modelo presenta los siguientes aspectos:

1. Las variables de decisión, sobre todo la tasa de abatimiento de las emisiones, no se pueden fijar arbitrariamente en cualquier nivel que uno sugiera; por ejemplo, no se puede planear tener una reducción de emisiones de 5% para el año 2015, por resultar en valores infinitos y por ende inmanejables, de algunas variables.
2. Las políticas fijas arrojan mayores niveles de producto, inversión, capital y consumo que las políticas que no son fijas, por lo que las hace ver más convenientes desde el punto de vista meramente económico.
3. Las políticas que no son constantes arrojan menores niveles de masas de carbono y de temperatura, lo cual las hace convenientes desde el punto de vista ambiental (suponiendo que fuese posible implementarlas en la vida real).
4. La correlación entre el nivel de las tasas de abatimiento de las emisiones y el beneficio social resulta negativa.
5. Las trayectorias que describen las variables del modelo conducen a escenarios donde los niveles de masas de carbono y temperaturas, especialmente las del fondo oceánico, crecen inevitablemente en proporciones alarmantes.

En concreto, los resultados que arroja el modelo *DICE-2013* conducen a que se prefieran las políticas con tasas de abatimiento pequeñas (prácticamente nulas), convenientes desde el punto de vista netamente económico pero no del ambiental. Por ende,

la hipótesis de esta investigación se rechaza. No obstante, hay que reconocer y agradecer a los autores de este modelo, Nordhaus y Sztorc (2013), su invaluable labor de investigación y difusión de este modelo, que posiblemente motivará la aparición de muchos otros modelos de análisis integrado.

APÉNDICES

Apéndice 1. Variables y parámetros del modelo *DICE-2013*

Aquí se hace una lista de todas las variables y parámetros del modelo *DICE-2013*, dividiéndoles en variables endógenas más importantes, variables de decisión, variables dinámicas exógenas, variables auxiliares endógenas y exógenas y parámetros.

Variables endógenas más importantes

$K(t)$	Stock mundial de capital en t medido en billones de dólares de 2005.
$M_{ATM}(t)$	Aumento de la concentración de carbono atmosférico en t , respecto el año 1750, medido en gigatoneladas de carbono.
$M_{UP}(t)$	Aumento de la concentración de carbono en la parte superior de los océanos en t , respecto el año 1750, medido en gigatoneladas de carbono.
$M_{LO}(t)$	Aumento de la concentración de carbono en la profundidad de los océanos en t , respecto el año 1750, medido en gigatoneladas de carbono.
$T_{ATM}(t)$	Incremento en t de la temperatura atmosférica respecto el año 1900, en °C.
$T_{LO}(t)$	Incremento en t de la temperatura de los océanos inferiores respecto el año 1900, en °C.
$\mathbf{M}(t)$	Vector masa de carbono en t .
$\mathbf{E}(t)$	Vector de emisiones de carbón en t .
$\mathbf{T}(t)$	Vector temperaturas medias globales en t .

Variables de decisión del modelo

$s(t)$ Tasa de ahorro bruto en t como fracción del producto mundial bruto.

$\mu(t)$ Tasa de abatimiento o tasa de control de las emisiones de CO₂ en t .

Variables dinámicas exógenas

$A(t)$ Nivel de stock tecnológico mundial o productividad total de los factores en t .

$L(t)$ Tamaño en t de la población mundial, considerada como la fuerza laboral mundial. Se mide en millones de personas.

$E_{def}(t)$ Emisiones de carbono por deforestación en t . Se miden en gigatoneladas de CO₂ por año.

$\sigma(t)$ Ratio de salida de las emisiones de carbono equivalente en t .

$C(t)$ Consumo mundial agregado en t . Se mide en dólares estadounidenses de 2005 por año.

$F_{EX}(t)$ Fuerza radiactiva en t proveniente de otros gases efecto invernadero diferentes del CO₂, medida en vatios por m².

Variables auxiliares

$Q(t)$ Producto mundial bruto neto de daños y costos del control de las emisiones en t medido en billones de dólares de 2005 por año. Variable endógena.

$\Omega(t)$ Fracción en que se merma la producción bruta en t por causa de los cambios de temperatura en la atmósfera. Variable endógena.

$daño(t)$ Daños económicos en el período t en billones de dólares de 2005 por año. Variable endógena.

$\Lambda_c(t)$ Costo de reducción de emisiones en t medido en billones de dólares de 2005 por año. Variable endógena.

$\Lambda(t)$ Fracción en que se merma la producción bruta en t debido a los costos de abatimiento de emisiones. Variable endógena.

$\varphi(t)$ Fracción de las emisiones en el régimen de control en t . Variable

	endógena.
$E(t)$	Emisiones de carbono en t . Se miden en gigatoneladas de CO ₂ por año. Variable endógena.
$E_{ind}(t)$	Emisiones industriales de carbono en t . Se miden en gigatoneladas de CO ₂ por año. Variable endógena.
$E_{indac}(t)$	Emisiones industriales de carbono acumuladas en t , medidas en gigatoneladas de carbono. Variable endógena.
$F(t)$	Incremento de la fuerza radiactiva en t respecto el año 1900, medido en vatios por m ² . Variable endógena.
$\mathbf{F}(t)$	Vector fuerza radiactiva en t .
$U_{periodo}(t)$	Función de utilidad en el período t . Variable endógena.
$U_{instantánea}(c(t))$	Función de utilidad instantánea o de bienestar social instantáneo del consumo en t . Variable endógena.
$c(t)$	Consumo mundial per cápita en t . Se mide en dólares estadounidenses de 2005 por año. Variable endógena.
$g_A(t)$	Tasa de crecimiento de la productividad total de los factores en $tstep$ años. Variable exógena.
$g_\sigma(t)$	Tasa de crecimiento de $\sigma(t)$ en $tstep$ años y también mejora acumulada de la eficiencia energética. Variable exógena.
W	Función objetivo. Valor presente de la utilidad. Se mide en unidades de utilidad. Variable endógena.
$R(t)$	Factor o tasa de descuento de la utilidad social promedio en t . Variable endógena.
$Y_{bruta}(t)$	Producto mundial bruto en t medido en billones de dólares de 2005 por año. Variable endógena.
$Y_{neta}(t)$	Producto mundial neto de daños climáticos evaluado en t . Se mide en billones de dólares de 2005 por año. Variable endógena.
$\theta_1(t)$	Costo ajustado por precio tope en t . Variable endógena.
$P_{bt}(t)$	Precio tope en t . Variable endógena.

$\mu_{superior}(t)$	Límite superior para la tasa de control de las emisiones de carbono en t . Variable endógena.
$\Lambda_{cm}(t)$	Costo marginal de abatimiento en t medido en dólares de 2005 por tonelada de CO ₂ . Variable endógena.
$P_{carbono}(t)$	Precio del carbono en t medido en dólares del 2005 por tonelada de CO ₂ . Variable endógena.
$I(t)$	Inversión en t medida en billones de dólares de 2005 por año. Variable endógena.
$r(t)$	Tasa de interés real por año, en t . Variable endógena.

Parámetros

η	Elasticidad de la utilidad marginal del consumo y aversión relativa al riesgo del individuo representativo.
δ_K	Tasa anual de depreciación del capital.
$\gamma \in (0,1)$	Elasticidad del capital en la función de producción.
ρ	Tasa pura de preferencia temporal social o tasa inicial de preferencia temporal social por año.
$M_{ATM,0}$	Valor inicial de $M_{ATM}(t)$.
$M_{UP,0}$	Valor inicial de $M_{UP}(t)$.
$M_{LO,0}$	Valor inicial de $M_{LO}(t)$.
$T_{ATM,0}$	Valor inicial de $T_{ATM}(t)$.
$T_{LO,0}$	Valor inicial de $T_{LO}(t)$.
K_0	Valor inicial de $K(t)$.
A_0	Valor inicial de $A(t)$.
L_0	Valor inicial de $L(t)$.
σ_0	Valor inicial de $\sigma(t)$.
$g_{A,0}$	Valor inicial de $g_A(t)$.

$g_{\sigma,0}$	Valor inicial de $g_{\sigma}(t)$.
$Y_{bruta,0}$	Valor inicial de $Y_{bruta}(t)$.
μ_0	Valor inicial de $\mu(t)$.
$E_{Ind,0}$	Valor inicial de $E_{Ind}(t)$.
$popadj$	Tasa de crecimiento para calibrar al año 2050 la proyección de población.
$popasintotica$	Nivel asintótico de población. Se mide en millones de personas.
$tstep$	Número de años que hay entre cada punto del tiempo muestreado.
$scale1$	Coefficiente de escalamiento dado.
$scale2$	Coefficiente de escalamiento dado.
T_{max}	Valor máximo que toma t .
$delat$	Tasa de declive del nivel de la productividad total de los factores para $tstep$ años.
ψ_1, ψ_2, ψ_3	Parámetros de $\Omega(t)$.
θ_2	Parámetro de $\Lambda_c(t)$ o de $\Lambda(t)$.
P_b	Costo de precio tope medido en dólares de 2005 por tonelada de CO ₂ de 2010.
g_b	Decremento inicial del costo de precio tope por periodo.
μ_{limite}	Límite superior de la tasa de control después del año 2150.
φ_2	Período en el que se tiene plena participación.
φ_{21}	Fracción de las emisiones bajo control el tiempo reglamentario.
φ_1	Fracción de las emisiones bajo control en 2010.
d_{σ}	Tasa de disminución de la descarbonización por período.
$E_{Tierra,0}$	Las emisiones de carbono de la Tierra; se mide en gigatoneladas de CO ₂ por año.

d_{Tierra}	Tasa de disminución de las emisiones terrestres por período.
ϕ_{11}	Tasa de transferencia de carbono de la atmósfera hacia la atmósfera por período.
ϕ_{21}	Tasa de transferencia de carbono de la parte superior de los océanos hacia la atmósfera por período.
ϕ_{12}	Tasa de transferencia de carbono de la atmósfera hacia la parte superior de los océanos por período.
ϕ_{22}	Tasa de transferencia de carbono de la parte superior de los océanos hacia la parte superior de los océanos por período.
ϕ_{32}	Tasa de transferencia de carbono de la profundidad de los océanos hacia la parte superior de los océanos por período.
ϕ_{23}	Tasa de transferencia de carbono de la parte superior de los océanos hacia la profundidad de los océanos por período.
ϕ_{33}	Tasa de transferencia de carbono de la profundidad de los océanos hacia la profundidad de los océanos por período.
M_{ATMEQ}	Concentración atmosférica de equilibrio; se mide en gigatoneladas de carbono.
M_{UPEQ}	Concentración de equilibrio de la parte superior de los océanos; se mide en gigatoneladas de carbono.
M_{LOEQ}	Concentración de equilibrio de la profundidad de los océanos; se mide en gigatoneladas de carbono.
$F_{2 \times CO_2}$	Aumento de la fuerza radiactiva debido a la duplicación de las concentraciones de CO_2 respecto el año 1900, medido en vatios por m^2 .
$F_{EX,0}$	Fuerza radiactiva en el año 2010 proveniente de otros gases efecto invernadero diferentes del CO_2 , medida en vatios por m^2 .
$F_{EX,1}$	Fuerza radiactiva en el año 2100 proveniente de otros gases efecto invernadero diferentes del CO_2 , medida en vatios por m^2 .
ξ_1	Coefficiente de la ecuación climática para el estrato superior.
ξ_2	Coefficiente de transferencia de estrato superior al inferior.
ξ_3	Coefficiente de transferencia para el estrato inferior.
$T_{2 \times CO_2}$	Impacto en la temperatura de equilibrio debido a la duplicación de las concentraciones de CO_2 respecto el año 1900, medido en $^{\circ}C$.

λ	Parámetro de realimentación para las ecuaciones de temperatura.
$S_{\text{óptimo}}$	Tasa de ahorro para el equilibrio asintótico.
\mathbf{M}_{ϕ}	Matriz de transición del ciclo del carbono.
\mathbf{M}_{ξ}	Matriz de transición de temperaturas.

Apéndice 2. Valor de los parámetros del modelo *DICE-2013*

$\eta = 1.45$	$\psi_2 = 0.00267$	$\phi_{11} = 0.912$
$\delta_K = 0.1$	$\psi_3 = 2$	$\phi_{21} = 0.038328889$
$\gamma = 0.3$	$\theta_2 = 2.8$	$\phi_{12} = 0.088$
$\rho = 0.015$	$P_b = 344$	$\phi_{22} = 0.959171111$
$T_{ATM,0} = 0.8$	$g_b = 0.025$	$\phi_{32} = 0.0003375$
$T_{LO,0} = 0.0068$	$\mu_{limite} = 1.2$	$\phi_{23} = 0.0025$
$K_0 = 135$	$\varphi_1 = 1$	$\phi_{33} = 0.9996625$
$A_0 = 3.8$	$\varphi_{21} = 1$	$M_{ATMEQ} = 588$
$g_{A,0} = 0.079$	$\varphi_2 = 21$	$M_{UPEQ} = 1350$
$L_0 = 6,838$	$d_\sigma = -0.001$	$M_{LOEQ} = 10000$
$Y_{bruta,0} = 63.69$	$M_{ATM,0} = 830.4$	$F_{2 \times CO_2} = 3.8$
$popadj = 0.134$	$M_{UP,0} = 1527$	$F_{EX,0} = 0.25$
$popasintotica = 10,500$	$M_{LO,0} = 10,010$	$F_{EX,1} = 0.7$
$tstep = 5$	$\sigma_0 = 0.549128363$	$\xi_1 = 0.098$
$scale1 = 0.016408662$	$E_{Ind,0} = 33.61$	$\xi_2 = 0.088$
$scale2 = -3855.106895$	$\mu_0 = 0.039$	$\xi_3 = 0.025$
$T_{max} = 60$	$g_{\sigma,0} = -0.01$	$T_{2 \times CO_2} = 2.9$
$dela = 0.006$	$E_{Tierra,0} = 3.3$	$\lambda = 1.310344828$
$\psi_1 = 0$	$d_{Tierra} = 0.2$	$S_{optimo} = 0.258278146$

Apéndice 3. Cuadros adicionales

Cuadro A1: Y_{bruta}(t)			
	Máximo	Mínimo	Promedio
Política 1	2,852.74	63.69	1,238.71
Política 2	2,868.74	63.69	1,220.79
Política 3	2,878.82	63.69	1,196.42
Política 4	2,090.28	63.69	922.22
Política 5	2,116.53	62.73	890.74
Política 6	2,797.82	63.69	1,214.35
Política 7	2,358.00	59.50	917.49
Política 8	2,544.14	63.25	1,080.29
Promedio:	2,563.38	62.99	1,085.13

Cuadro A2: Q(t)			
	Máximo	Mínimo	Promedio
Política 1	2,285.59	63.54	1,060.20
Política 2	2,328.19	10.33	1,029.46
Política 3	2,356.67	15.01	998.65
Política 4	1,766.76	63.13	812.41
Política 5	1,798.30	62.58	787.52
Política 6	2,250.36	63.54	1,042.23
Política 7	2,007.50	10.01	795.25
Política 8	2,109.59	10.26	924.70
Promedio:	2,112.87	37.30	931.30

Cuadro A3: I(t)			
	Máximo	Mínimo	Promedio
Política 1	590.32	16.41	273.83
Política 2	601.32	2.67	265.89
Política 3	608.68	3.88	257.93
Política 4	364.94	5.00	107.47
Política 5	355.66	0.59	94.38
Política 6	553.35	15.63	256.28
Política 7	408.48	0.19	105.00
Política 8	403.32	1.96	176.79
Promedio:	485.76	5.79	192.19

Cuadro A4: K(t)			
	Máximo	Mínimo	Promedio
Política 1	6,923.35	135.00	3,071.39
Política 2	7,053.56	59.11	2,969.25
Política 3	7,136.57	87.54	2,868.70
Política 4	2,787.84	135.00	1,190.02
Política 5	3,133.68	87.15	1,065.83
Política 6	6,488.89	135.00	2,874.53
Política 7	3,833.00	40.98	1,169.44
Política 8	4,726.91	47.49	1,974.47
Promedio:	5,260.48	90.91	2,147.95

Cuadro A5: C(t)			
	Máximo	Mínimo	Promedio
Política 1	1,695.28	47.13	786.37
Política 2	1,726.87	7.66	763.57
Política 3	1,748.00	11.13	740.72
Política 4	1,593.43	48.81	704.94
Política 5	1,719.98	49.89	693.14
Política 6	1,697.01	47.92	785.95
Política 7	1,888.24	9.73	690.25
Política 8	1,706.27	8.30	747.91
Promedio:	1,721.88	28.82	739.11

Cuadro A6: M_{ATM}(t)			
	Máximo	Mínimo	Promedio
Política 1	4,625.60	830.40	2,865.89
Política 2	4,399.27	830.40	2,640.65
Política 3	4,162.61	830.40	2,499.70
Política 4	3,634.22	830.40	2,373.65
Política 5	3,511.92	830.40	2,315.97
Política 6	4,547.61	830.40	2,823.40
Política 7	3,537.03	830.40	2,229.61
Política 8	3,977.74	830.40	2,425.11
Promedio:	4,049.50	830.40	2,521.75

Cuadro A7: M_{UP}(t)			
	Máximo	Mínimo	Promedio
Política 1	7,387.41	1,527.00	3,902.49
Política 2	6,919.11	1,527.00	3,602.20
Política 3	6,532.27	1,527.00	3,453.19
Política 4	6,012.59	1,527.00	3,396.79
Política 5	5,830.04	1,527.00	3,345.90
Política 6	7,272.05	1,527.00	3,857.31
Política 7	5,698.66	1,527.00	3,208.59
Política 8	6,313.96	1,527.00	3,381.54
Promedio:	6,495.76	1,527.00	3,518.50

Cuadro A8: M_{Lo}(t)			
	Máximo	Mínimo	Promedio
Política 1	10,388.15	10,010.00	10,120.81
Política 2	10,343.08	10,010.00	10,105.21
Política 3	10,321.04	10,010.00	10,100.81
Política 4	10,313.57	10,010.00	10,101.88
Política 5	10,306.16	10,010.00	10,100.78
Política 6	10,381.47	10,010.00	10,119.04
Política 7	10,285.38	10,010.00	10,092.11
Política 8	10,310.55	10,010.00	10,097.14
Promedio:	10,331.17	10,010.00	10,104.72

Cuadro A9: T_{ATM}(t)			
	Máximo	Mínimo	Promedio
Política 1	8.63	0.80	5.53
Política 2	8.40	0.80	5.18
Política 3	8.17	0.80	5.04
Política 4	7.69	0.80	4.98
Política 5	7.56	0.80	4.92
Política 6	8.56	0.80	5.48
Política 7	7.51	0.80	4.73
Política 8	8.00	0.80	4.93
Promedio:	8.06	0.80	5.10

Cuadro A10: T_{Lo}(t)			
	Máximo	Mínimo	Promedio
Política 1	5.09	0.01	2.19
Política 2	4.82	0.01	2.02
Política 3	4.67	0.01	1.98
Política 4	4.57	0.01	1.99
Política 5	4.50	0.01	1.98
Política 6	5.05	0.01	2.17
Política 7	4.37	0.01	1.86
Política 8	4.58	0.01	1.92
Promedio:	4.71	0.01	2.01

BIBLIOGRAFÍA

- Ackerman, F., DeCanio, S. J., Howarth, R. B. y Sheeran, K. (2009). Limitations of integrated assessment models of climate change. *Climatic change*, Vol. 95, No. 3-4, pp. 297-315.
- Almagro Vázquez, F. (2009). *Cuentas ecológicas y desarrollo sustentable. La experiencia de México*. México: Instituto Politécnico Nacional.
- Almagro Vázquez, F. (2011). *Problemas estructurales, crecimiento y desarrollo sustentable en México*. Alemania: Editorial Académica Española.
- Barzev, R. (2002). Guía metodológica de valoración económica de bienes, servicios e impactos ambientales. *Proyecto para la consolidación del corredor biológico mesoamericano. Serie técnica*, Vol. 4, pp. 149.
- Cass, D. (1965). Optimum growth in an aggregative model of capital accumulation. *The Review of Economic Studies*, Vol. 32, No. 3, pp. 233-240.
- Chang, Man Yu. (2005). “La economía ambiental.” En G. Foladori y N. Pierri (eds.), *¿Sustentabilidad? Desacuerdos sobre el desarrollo sustentable*. (pp. 175-188). México: Miguel Ángel Porrúa.
- Conesa, J. C. y Garriga, C. (2006). *Teoría Económica del Capital y la Renta*. Universidad Autónoma de Barcelona.
- Döll, S. (2009). *Climate change impacts in computable general equilibrium models: An overview*. Documento de trabajo, No. 1-26. Hamburgo: Hamburg Institute of International Economics.
- Gago, A.; Labandeira, X. y M. Rodríguez (2004). “Evidencia empírica internacional sobre los dividendos de la imposición ambiental.” En M. Buñuel (ed.) *Fiscalidad Ambiental*. (pp. 1-23). Madrid: Civitas.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2011). *Sistema de Cuentas Nacionales de México: Metodología*. México: INEGI.

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2012). *Sistema de Cuentas Nacionales de México. Cuentas económicas y ecológicas de México, 2006-2010*. México: INEGI.
- Jensen, S. y Traeger, C. (2012). Climate Policy and Growth Uncertainty: Dicing with DICE.
- Koopmans, T. C. (1963). *On the concept of optimal economic growth* (No. 163). Cowles Foundation for Research in Economics, Yale University.
- Miller, R. E. y Blair, P. D. (2009). *Input-Output Analysis. Foundations and Extensions*. (2^{da} ed.). Cambridge: Cambridge University Press.
- Nordhaus, W. D. y Sztorc, P. (2013). *DICE 2013 R: Introduction and User's Manual*. (2da ed.).
- ONU, et. al. (2003). *System of Environmental and Economic Accounting 2003*. New York: ONU.
- Presidencia de la República. (2007). *Plan Nacional de Desarrollo 2007-2012*. México: Presidencia de la República.
- Ramsey, F. P. (1928). A mathematical theory of saving. *The Economic Journal*, Vol. 38, No. 152, pp. 543-559.
- United Nations. (1987). *Our Common Future. Report of the World Commission on Environment and Development*.
- Wing, I. S. (2011) "Computable General Equilibrium Models for the Analysis of Economy-Environment Interactions." En A. Batabyal y P. Nijkamp (eds.), *Research Tools in Natural Resource and Environmental Economics*. (pp. 255-319). Boston: Boston University.