

Algunas implicaciones éticas y analíticas de la microfundamentación en la economía del cambio climático

On the ethical and analytical consequences of using microfoundations in the economics of climate change

Carlos A. López Morales*

Resumen

Este documento explora con motivación didáctica un modelo simple que expone algunos elementos básicos de la economía del cambio climático que han suscitado debate académico en la última década. A raíz de la publicación en 2006 del llamado Reporte Stern, la literatura académica ha centrado el debate en dos aspectos fundamentales de la modelación de ese problema global: la elección particular de algunos parámetros como microfundamentos que reflejan comportamientos más bien éticos sobre el tratamiento del futuro y la desigualdad, y la modelación de los aspectos estocásticos asociados a fenómenos que ocurren en el futuro relativamente distante. Este documento expone con un modelo sencillo los elementos asociados al primer aspecto. La pretensión es la de acercar a los estudiantes de economía algunas de las consecuencias éticas y analíticas del proceder convencional en la teoría económica dedicada al estudio del problema climático global. A esta breve introducción siguen tres secciones: la primera expone el modelo de referencia con una implementación numérica ilustrativa, la segunda discute asuntos asociados al descuento del futuro y las nociones de equilibrio utilizadas en la modelación estándar, y la tercera presenta brevemente una discusión sobre la consistencia del proceder paramétrico convencional. Una última sección incluye breves reflexiones a modo de cierre.

Palabras clave:

- Economía del cambio climático
- Optimización dinámica
- Microfundamentos

Abstract

This paper explores a simple model that highlights for a wider audience some of the main elements of the economics of climate change that have motivated academic debate over the last decade. After the release in 2006 of the Stern Report, academic economists have argued over two crucial aspects involved in economic modeling of this global problem: the particular choice as microfoundations of certain parameters describing ethical behaviors regarding both the future and inequality, and the particular strategies for modeling variables that exhibit stochastic nature in the distant future. The simple model herein exposed is able to deal with many of the issues of the first aspect. The motivation is to make available to students of economics some of the ethical and analytical consequences of economic theory's conventional strategy utilized in models to analyze the economics of global climate change. The first section of the paper presents an exhibit of the model that includes a numerical representation for illustration purposes. Section two links the choice over the discount rate to two notions of economic equilibrium. Section three presents a brief discussion on the consistency of the parametrical choices conventionally made in the economic literature on climate change. Finally, some words are included for concluding purposes.

Keywords:

- Economics of Climate Change
- Dynamic Optimization
- Microfoundations

JEL: C61, Q01, Q32, Q54

* Profesor de teoría económica en la División de Estudios Profesionales de la Facultad de Economía de la UNAM. Correspondencia: carlos.a.lopez@comunidad.unam.mx

tar la acumulación atmosférica de emisiones consistente con esa capacidad. Tercero, el problema dinámico se resuelve tomando en cuenta el bienestar de las generaciones presentes y de las generaciones futuras, pero se asume impaciencia temporal de la sociedad actual, que es la que resuelve el problema, lo que implica que el bienestar futuro recibe una ponderación menor que el bienestar presente. Dicho de otro modo, la sociedad descuenta el futuro a tasas positivas, y la función de bienestar total calcula el valor presente del flujo de bienestar en cada t en todo el horizonte de planeación. Formalmente,

$$B = \int_0^{\infty} e^{-\rho t} U(C_t) dt \quad (2)$$

donde ρ representa la tasa de preferencia temporal de la sociedad. El problema económico consiste entonces en alcanzar el valor máximo posible de B sujeto a la restricción 1. Esta formulación hace dos supuestos implícitos que no alteran los objetivos de la modelación. Primero, se asume que las emisiones de GEIS, que se representan por C_t , se acumulan linealmente en la atmósfera. Es decir, si se emiten 10 unidades de GEIS, se utilizan las mismas 10 unidades de la capacidad de almacenamiento \bar{S} . Segundo, se hace caso omiso a las tasas de decaimiento que puedan corresponder a los diferentes GEIS acumulados en la atmósfera. Es decir, se asume que una vez que una unidad de C_t se encuentra en la atmósfera se queda allí para siempre.³

Antes de mirar la estrategia de solución del problema descrito, conviene realizar una conversión de variables para facilitar su tratamiento analítico. Sea que la variable R_t mide el monto de capacidad atmosférica remanente y disponible a partir del tiempo t . R_t es la diferencia entre el total del acervo disponible \bar{S} y la acumulación de gases hasta el tiempo t . Formalmente,

relevancia internacional por su militancia académica y política desde el Instituto Goddard para Estudios Espaciales de la NASA a favor del combate al cambio climático, ha establecido el famoso umbral de las 350 partes por millón (ppm) de CO₂ como aquel que asegura las condiciones climáticas planetarias de la era pre-industrial. En contraste, las observaciones recientes ubican dicha concentración en alrededor de 400 ppm.

³ Si bien pudieran incorporarse tasas positivas de decaimiento atmosférico, éstas resultan ser muy bajas: algunas estimaciones encuentran que incluso el 15% de las emisiones actuales se encontrarán acumuladas atmosféricamente 500 años en el futuro. Los lectores interesados pueden encontrar en Maier-Reimer y Hasselman (1987) y en Azar y Sterner (1996) algunos modelos climáticos que explicitan estos asuntos. En López-Morales (2008) se puede observar una implementación de estos modelos en el contexto de la discusión sobre el costo social marginal del carbono.

$$R_t = \bar{S} - \int_0^t C_t dt \tag{3}$$

Diferenciamos con respecto a t para ver la dinámica de R_t :

$$\frac{\partial R}{\partial t} = -C_t \tag{3'}$$

La expresión (3') indica de modo simple que la capacidad disponible de almacenamiento atmosférico de GEIS disminuye en cada t en el mismo monto en el que de hecho se emiten GEIS a la atmósfera en t . Esta modificación permite escribir el problema del siguiente modo, que resulta un tanto más simple:

$$\max \int_0^{\infty} e^{-\rho t} U(C_t) dt$$

sujeto a

$$\frac{\partial R}{\partial t} = -C_t$$

El algoritmo de solución requiere formular la siguiente función Hamiltoniana:

$$H_t = U(C_t) - \lambda_t C_t \tag{4}$$

con λ_t representando la variable de co-estado. Dicha variable mide también el precio sombra de la capacidad atmosférica en términos de la función de bienestar B . De la condición de primer orden para maximizar (4) se obtiene

$$U'(C_t) = \lambda_t \tag{5}$$

y del principio del máximo se sigue que

$$\frac{\partial \lambda}{\partial t} = \rho \lambda_t \tag{6}$$

que es una ecuación diferencial con solución en

$$\lambda_t = \lambda_0 e^{\rho t} \tag{7}$$

La función (7) implica que el precio sombra de la capacidad atmosférica de acumulación de GEIS crece a una tasa constante equivalente a la tasa de preferencia temporal a la que la sociedad descuenta el futuro.⁴ El algoritmo de solución prosigue con la diferenciación de (5) con respecto a t y su combinación con (6), de lo que se obtiene la siguiente expresión que describe la dinámica de la política óptima de consumo

$$\frac{\partial C}{\partial t} \frac{1}{C} = g(C_t) = \frac{-\rho}{\eta(C)} \quad (8)$$

Donde $\eta(C) = -\frac{U''(C)}{U'(C)}C$ mide la elasticidad-consumo de la utilidad marginal.⁵ La expresión (8) mide la tasa de cambio temporal del consumo y caracteriza la política óptima: dado que ρ y $\eta(C)$ son parámetros no negativos, las emisiones óptimas de GEIS son decrecientes en el tiempo. Por este motivo, las generaciones presentes disfrutan de un bienestar más alto derivado de emisiones más altas con respecto a las generaciones futuras, que deberán reducir las emisiones y, por tanto, su bienestar. El resultado obtenido en (8), y sus implicaciones para la dinámica de (4), han llevado a la literatura (por ejemplo, Farzin 2002) a concluir que una economía que depende últimamente de un recurso no-renovable (llamada también “cake-eating economy”) simplemente no puede ser sustentable, ya sea que para ello requiera acceso igualitario al acervo del recurso (siguiendo a Brundtland), ya sea requiriendo constancia en el producto neto que, siguiendo a Weitzman (1976), estaría aquí representado por la función Hamiltoniana (4), a la sazón claramente decreciente en el óptimo.

La inclusión de supuestos adicionales permite obtener mayor información respecto la política óptima de emisiones y su dependencia a diferentes valores de los parámetros ρ y $\eta(C)$. Si $U(C_t)$ pertenece a la familia de funciones de utilidad isoelásticas, entonces $\eta(C)$ es constante. Podemos analizar el caso en el que $U(C_t) = \ln(C_t)$, lo que implica que $\eta(C)=1$.⁶ En este caso, operaciones

⁴ Los lectores azuzados notarán que esta condición no es otra distinta a la famosa regla de Hotelling (1931) para la explotación de los recursos no renovables. En Perman *et al.* (2002) se puede encontrar una exposición de libro de texto de dicho modelo.

⁵ En otras palabras, $\eta(C)$ mide la respuesta porcentual de la utilidad marginal ante el cambio de un punto porcentual en el consumo. En términos matemáticos $\eta(C)$ es una medida de la curvatura de la función de utilidad marginal. Usualmente se le interpreta como el grado de aversión ante la desigualdad en el consumo: entre mayor sea dicha respuesta mayor será el incentivo a suavizar temporalmente consumo, lo que se asocia a aversión a la desigualdad alta. Los lectores interesados pueden encontrar en Bekerman (2011) ésta y otras interpretaciones éticas de la economía en el contexto del cambio climático y de otros problemas no menos polémicos.

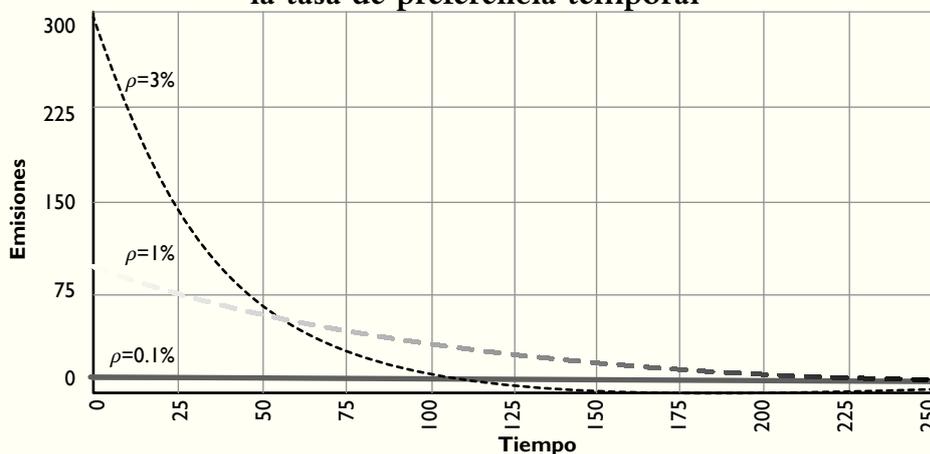
⁶ Es claro que, además, $U(C_t) = \ln(C_t)$ cumple con los requisitos para $U(C_t)$: la utilidad marginal es positiva pero decreciente, y es infinita para el caso límite en el que $C_t=0$.

de rutina permiten ver que la política óptima $\{C_t\}_{t=0}^{\infty}$ queda explícita en la siguiente expresión:

$$C_t = \rho \bar{S} e^{-\rho t} \tag{9}$$

A pesar de su sencillez, la expresión (9) permite representar numéricamente algunos de los aspectos más importantes del debate académico-político alrededor de la economía del cambio climático, señaladamente aquél que sigue a la publicación del Reporte Stern en 2006. La Figura 1 y 2 muestran la sensibilidad de la política óptima de emisiones, expresión (9), y de su acumulación atmosférica, expresión (1), a diferentes valores del parámetro ρ que reflejan diferentes actitudes respecto del futuro.⁷ La Figura 1 muestra claramente cómo la tasa de preferencia temporal afecta no sólo la tasa a la que declina el consumo óptimo periodo a periodo, sino el monto inicial al inicio del periodo de planeación: entre más elevada la tasa de descuento (lo que refleja mayor ponderación al presente que al futuro en (2)), mayores las emisiones de GEIs en el presente y mayor la tasa a la que decaen en el futuro.

Figura 1
Sensibilidad de la política óptima de emisiones sobre la tasa de preferencia temporal

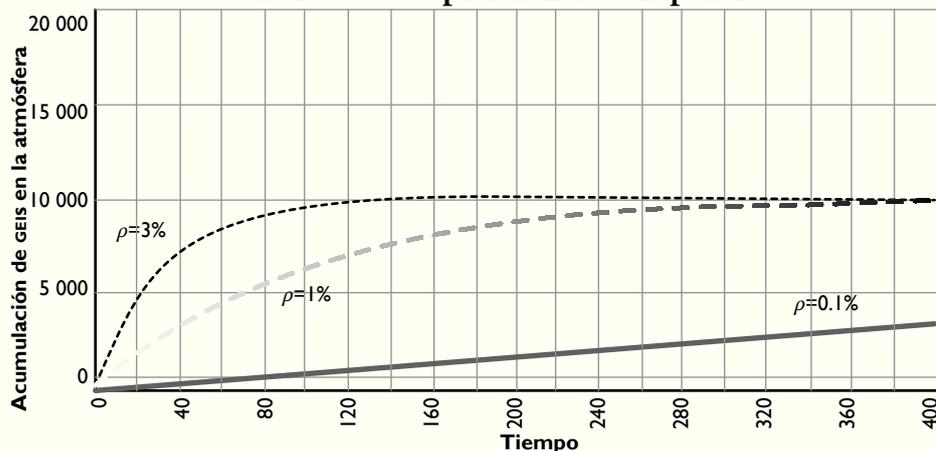


Fuente: elaboración propia

⁷ La simulación que se reporta ahora asume tres valores para ρ : 3%, 1% y 0.1%. Además, se ha fijado arbitrariamente la capacidad de almacenamiento atmosférico en 10 000 unidades.

La Figura 2 muestra la acumulación óptima de emisiones en la atmósfera asociada a cada una de las políticas óptimas de la Figura 1, y muestra claramente los efectos de la tasa de preferencia temporal. Al 3%, casi el total de \bar{S} se agota en alrededor de 150 años; al 1% se requieren 4 siglos para casi agotar el total de \bar{S} ; al 0.1% se requieren algunos miles de años para agotar el acervo. Es de notar que la forma de las políticas óptimas de emisiones desplegadas en las figuras 1 y 2 reproduce las características de la política óptima de los modelos integrales de cambio climático (como el famoso modelo DICE de Nordhaus): estas políticas implican iniciar desde el presente con la reducción de emisiones, pero dejar la mayor parte de la mitigación para el futuro. Este hecho ha llevado a Weitzman a notar que la forma de rampa de la política óptima (ver Figura 2) es consecuencia de la estrategia de modelación (suavizamiento del consumo sobre el horizonte de planeación), y no consecuencia de conocimiento crucial sobre las interacciones de los sistemas climático y económico (Weitzman, 2007).

Figura 2
Sensibilidad de la acumulación atmosférica de GEIS
sobre la tasa de preferencia temporal

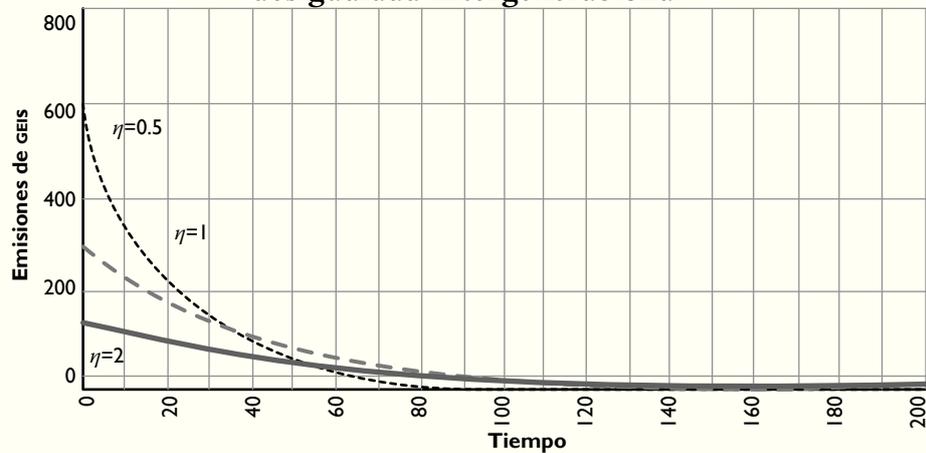


Fuente: elaboración propia

La dependencia de la política de emisiones y de su acumulación atmosférica sobre el parámetro de aversión a la desigualdad $\eta(C)$ se muestra en las figuras 3 y 4. Se asumen tres valores arbitrarios: $\eta=0.5$, $\eta=1$ y $\eta=2$. La Figura 3 muestra la política óptima de (8) para cada uno de estos valores. Como se ve, entre menor sea la elasticidad-consumo de la utilidad marginal mayor es

el consumo presente respecto al futuro y, por tanto, menor la aversión a la desigualdad intergeneracional. La política que suaviza temporalmente el consumo en mayor grado es cuando se asume $\eta=2$, lo que implica una aversión a la desigualdad intergeneracional alta.

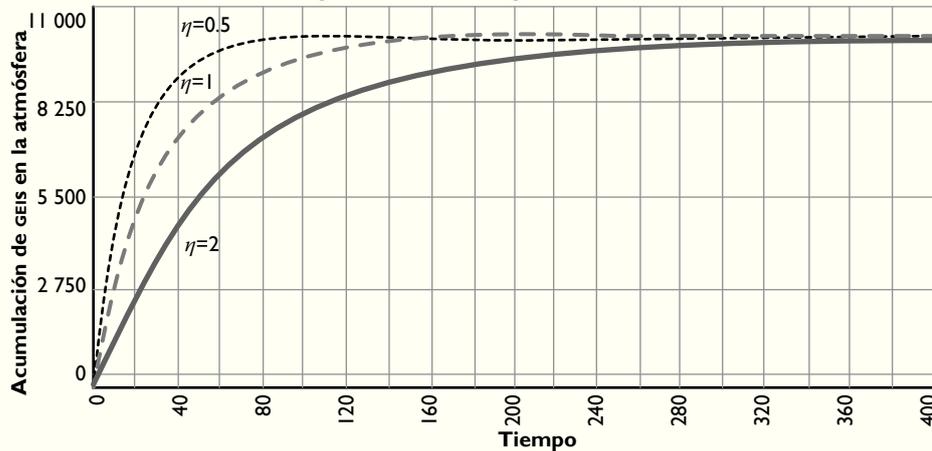
Figura 3
Sensibilidad de la política óptima de emisiones a la aversión de desigualdad intergeneracional



Fuente: elaboración propia

Los comportamientos de la Figura 3 implican las concentraciones atmosféricas desplegadas en la Figura 4. Como se ve, los efectos sobre la acumulación de emisiones son significativos pero mucho menores a aquellos que puedan asociarse a la tasa de preferencia temporal (Figura 2). Aún así, el suavizamiento del consumo provocado por mayor aversión a la desigualdad puede retrasar por unos tres siglos el agotamiento de la capacidad atmosférica de almacenamiento de GEIS: cuando $\eta=0.5$, y dicha aversión es débil, el acervo prácticamente se agota en menos de 100 años; cuando $\eta=2$, y dicha aversión es más fuerte, se requieren casi 4 siglos para agotar el acervo. Es de notar que el efecto del parámetro η mitiga o amplifica los efectos de la tasa de preferencia temporal: un valor $\eta=0.5$ equivale a duplicar el valor de ρ , mientras que un valor $\eta=2$ equivale a reducir a la mitad el valor de ρ (ver ecuación 8).

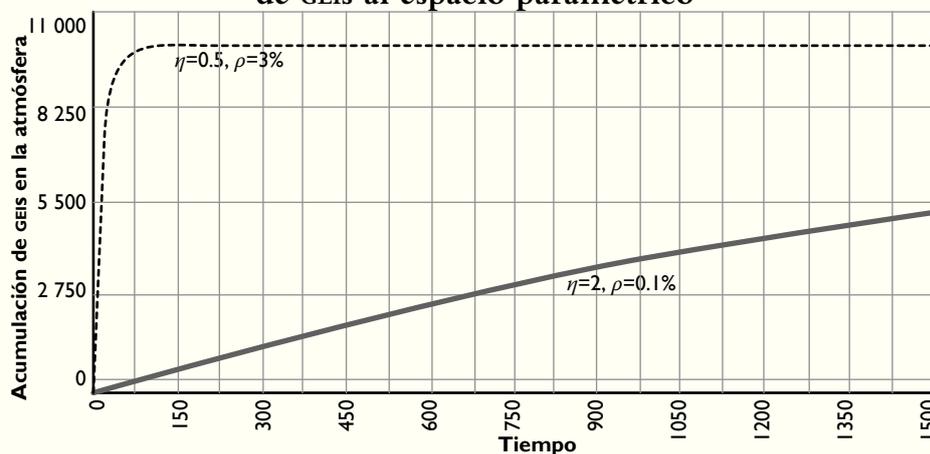
Figura 4
Sensibilidad de la acumulación atmosférica de GEIs a la aversión de
desigualdad intergeneracional



Fuente: elaboración propia

Con todo, este breve modelo recoge algunos de los puntos importantes del debate académico de la economía del cambio climático: la dependencia de la política óptima al espacio paramétrico. Dado que prácticamente no existen calibraciones a escala de economía mundial para estimar el valor de los parámetros ρ y η que puedan aplicarse a modelos definidos para esa misma escala, sus valores prácticamente están al arbitrio del investigador en turno. La Figura 5 muestra esto gráficamente para la concentración atmosférica con los valores de los parámetros aquí asumidos con un par de combinaciones extremas: $\rho=3\%$ y $\eta=0.5$ para describir una sociedad temporalmente impaciente (ponderando más al presente que al futuro) y no-aversa a la desigualdad en el consumo (le va perfectamente bien con patrones de consumo temporalmente no suavizados); y $\rho=0.1\%$ y $\eta=2$ para describir a una sociedad con paciencia temporal (que pondera más equitativamente presente y futuro) y aversa a la desigualdad (prefiere patrones de consumo suavizados en el tiempo).

Figura 5
Sensibilidad de las concentraciones atmosféricas
de GEIS al espacio paramétrico



Fuente: elaboración propia

En la primer combinación de parámetros ($\rho=3\%$ y $\eta=0.5$, representando a una sociedad temporalmente impaciente y no aversa a la desigualdad), casi el total de la capacidad atmosférica de almacenamiento se agota en unos 75 años: las generaciones presentes de esta sociedad se agotan el recurso y dejan a las generaciones futuras casi sin consumo posible.⁸ En la segunda combinación de parámetros ($\rho=0.1\%$ y $\eta=2$, representando a una sociedad temporalmente paciente y aversa a la desigualdad), el 50% de la capacidad atmosférica está disponible para uso incluso 15 siglos en el futuro: las generaciones presentes son prudentes y consumen de a muy poco, posibilitando el consumo futuro incluso varios siglos hacia adelante.⁹ De hecho, la Figura 5 despliega un espacio paramétrico muy amplio en el que prácticamente cualquier política de reducción de emisiones puede definirse como óptima para la combinación de parámetros adecuada.

⁸ En términos éticos, para decirlo con el filósofo español Manuel Sacristán, esta primer combinación paramétrica puede representar el comportamiento de una sociedad que en su expansión establece la semilla de su autodestrucción. Sacristán la llamó “la especie exagerada, la especie de la hybris” (Sacristan, 1979).

⁹ Para seguir con las imágenes sacristanianas, esta combinación paramétrica puede representar el comportamiento de una sociedad que se autocontrola y que se establece límites, no sin renunciar al disfrute mesurado de los recursos escasos. Esta sociedad puede definirse bien como si fuera parte del rebaño de Epicuro (ver Riechmann, 2006).

II. Descuento social del futuro, nociones de equilibrio, y cambio climático

El descuento del futuro en el contexto del cambio climático ha recibido mucha de la atención en las últimas décadas, pero el estudio de su analítica y sobre sus implicaciones para economías que optimizan dinámicamente es mucho más antiguo. Ramsey (1928), por ejemplo, realiza una famosa crítica a la práctica de utilizar tasas de descuento positivas,¹⁰ Koopmans (1974) explica un caso en el que la práctica del descuento es desastrosa en el sentido de adelantar el final del horizonte de planeación, cuando éste se asume finito. Más aún, Gale (1967) nota que, a pesar de la crítica de argumento ético que ya se encontraba disponible cuando él escribía, un modelo de economía “cake-eating” con horizonte infinito, como el descrito en la sección previa, requiere de tasas de preferencia temporal positivas para tener sentido analítico (de otro modo, no existe política óptima posible).¹¹

Pero existe un concepto adicional para la tasa de descuento que ha atraído la atención en estos asuntos: la tasa de descuento social, que es diferente a la tasa privada de descuento, ρ . De acuerdo con Perman *et al.*, (2003), o con Heal (1998 y 2008), dicha tasa se puede definir como el negativo de la tasa a la que cambia el valor de un incremento marginal en el consumo conforme su temporalidad se atrasa marginalmente. Dicho de otro modo, la tasa social es una medida de la diferencia entre la utilidad marginal en algún tiempo t y otro tiempo $t+\varepsilon$, para un ε arbitrariamente pequeño. Si B_t en la expresión (2), es la tasa de utilidad social, el valor presente de la utilidad marginal es, simplemente,

$$e^{-\rho t} U'(C_t) \quad (10)$$

Entonces, el negativo de la tasa de cambio de (10) es:

$$r_t = -\frac{\frac{\partial}{\partial t} e^{-\rho t} U'(C_t)}{e^{-\rho t} U'(C_t)} = \rho + \eta(C)g(C_t) \quad (11)$$

¹⁰ “Uno debe enfatizar un asunto de modo más particular: se asume que no debemos descontar el disfrute futuro en comparación con el disfrute presente, que es una práctica éticamente indefensible y que deriva únicamente de la debilidad de la imaginación...” (Ramsey, 1928).

¹¹ Lo que resulta, además, fácil de ver: si $\rho=0$, la expresión (8) informa de una tasa constante de consumo de un acervo finito en horizonte temporal infinito, lo que claramente es no factible al violar la condición (1).

que los flujos óptimos de consumo e inversión se eligen tal que la productividad marginal del capital sea equivalente a r_t tal y como está definida en la expresión (11),¹³ lo que implica un equilibrio dinámico en el que el costo en bienestar de retrasar cierto monto de consumo de un t hacia un $t+\varepsilon$ es exactamente igual a la ganancia derivada de invertir ese monto en aumentar el acervo de capital entre t y $t+\varepsilon$.

En el contexto del cambio climático, dicho equilibrio dinámico en un modelo de equilibrio general con acervos de capital implicaría que las reducciones en bienestar asociadas a caídas en la producción de GEIS se asocian con aumentos equivalentes en el bienestar derivados de incrementos adecuados en el acervo de capital. En otras palabras, se asume cierta sustituibilidad entre la capacidad atmosférica de almacenar GEIS con algunos acervos de capital manufacturado, supuesto que, en términos de su factibilidad técnica, puede resultar heroico. Esta discusión genera dos lecciones generales. Primero, se aclara cómo tratar la expresión (11). En equilibrio parcial, como ecuación: conocidos r_t y $g(C_t)$, se eligen ρ y $\eta(C_t)$ tal que (11) se mantenga. En equilibrio general, como definición, elegir ρ y $\eta(C_t)$ arbitrariamente y dejar que $g(C_t)$ se defina por (8) y que r_t se determine endógenamente.

Segundo, en el contexto del cambio climático no lleva mucho sentido asumir tasas de crecimiento económico exógenas en modelos de equilibrio parcial. Al contrario, como Heal (2008) expone, precisamente porque la economía del cambio climático analiza acciones que deben tener repercusiones sistémicas, la tasa de crecimiento $g(C_t)$ debe ser endógena y el modelo debe ser de equilibrio general. Estas dos lecciones, sin embargo, no aclaran cómo han de elegirse los valores para los parámetros ρ y $\eta(C_t)$ para incorporarse en un modelo de equilibrio general, por lo que la discusión de la tasa social de descuento no resuelve el problema de la dependencia de la política óptima al espacio paramétrico mostrado en la Figura 5.

III. Elecciones paramétricas y modelación consistente

La modelación de los apartados previos, si bien contiene los resultados generales que han resultado más polémicos en la discusión académica reciente, es un tanto simplificada respecto la utilizada en los estudios de la literatura relevante. En general, los modelos económico-climáticos son una variación de la estrategia Ramsey-Koopmans-Cass para modelar crecimiento económico en economías que optimizan dinámicamente basadas en comportamientos de

¹³ A esta equivalencia se le conoce como la ecuación de Ramsey.

Tabla I
Elecciones paramétricas en la ecuación de Ramsey
en diversos estudios climáticos

Estudio	ρ	$\eta(C_t)$	$g(C_t)$	r_t	Razones
Cline (1992)	0	1.5	1.3%	1.95%	Éticas
Nordhaus (1994)	3%	1	1.3%	4.3%	Calibración con economías de mercado
Stern (2006)	0.1%	1	1.3%	1.4%	Éticas

Fuente: elaboración propia con base en Dasgupta (2007).

Para evaluar la consistencia de las elecciones paramétricas de la Tabla 1, Dasgupta (2007) las inserta en un modelo determinístico de consumo-ahorro para concluir que todas ellas son “mala economía”, “mala filosofía”, y “mala ética”. En dicho modelo, la relación de la inversión al producto depende de dichos parámetros (también Weitzman 2007 alerta sobre este resultado): bajo la elección de Stern (2006) la relación inversión-producto es de 0.97, implicando que el 97% del producto debe ahorrarse e invertirse en la trayectoria óptima, lo que resulta un absurdo, según Dasgupta (2007). Y mientras la elección de Nordhaus pueda resultar en una relación inversión-producto con más sentido económico, Dasgupta la descalifica por basarse en calibraciones con datos observados de economías de mercado, lo que es un proceder conceptualmente inadecuado en el contexto del masivo problema de los comunes del cambio climático: los precios de mercado, como se sabe, no son buenos indicadores de escasez o de preferencias en presencia de externalidades.

A modo de cierre

Este artículo interpreta el modelo canónico de dependencia a recursos naturales no renovables en el contexto del cambio climático para exponer algunos elementos clave del debate académico de la última década. En particular, el modelo presentado muestra la dependencia de la política óptima de emisiones de GEIS a la elección de valores para dos parámetros de comportamiento particulares: la tasa de descuento subjetiva, que describe la impaciencia temporal de la sociedad, y la elasticidad-consumo de la utilidad marginal, que describe la aversión de la sociedad a la desigualdad. La política óptima de emisiones asociada a la combinación paramétrica que describe a una sociedad impaciente y no aversa a la desigualdad consume en el presente la totalidad de la

Referencias

- Azar, C. and T. Sterner (1996), "Discounting and distributional considerations in the context of global warming," *Ecological Economics* 19, p. 169-184.
- Bekerman, W. (2011), *Economics as Applied Ethics. Value Judgements in Welfare Economics*, Palgrave Macmillan, Nueva York.
- Cline, W. (1992), *The Economics of Global Warming*, Institute for International Economics, Washington, D.C.
- Dasgupta, P. and G. Heal (1974), "The Optimal Depletion of Exhaustible Resources," *The Review of Economic Studies* 41. Symposium on the Economics of Exhaustible Resources, pp. 3-28.
- Dasgupta, P. (2007), "Comments on the Stern Review's Economics of Climate Change", mimeo. <http://www.econ.cam.ac.uk/faculty/dasgupta/stern07.pdf>
- Farzin, Y. (2002), "Can an Exhaustible Resource Economy be Sustainable?" *Nota di Lavoro* 47.2002, Fondazione Enio Enrico Mattei, Italia.
- Gale, D. (1967), "On Optimal Development in a Multi-Sector Economy," *The Review of Economic Studies* 34 (1), pp. 1-18.
- Heal, G. (1998), *Valuing the Future: Economic Theory and Sustainability*, Columbia University Press, New York.
- Heal, G. (2008), "Climate Economics: A Meta-Review and Some Suggestions," NBER Working Paper 13927, NBER, Cambridge.
- Hotelling, H. (1931), "The Economics of Exhaustible Resources," *The Journal of Political Economy* 39 (2), pp.137-175.
- Koopmans, T. (1974), "Proof for a Case where Discounting advances the Doomsday," *The Review of Economic Studies* 41, Symposium on the Economics of Exhaustible Resources, pp. 117-120.
- López-Morales, C. (2003), *Desarrollo sustentable: situaciones y comportamientos básicos*, Tesis de Maestría. Centro de Investigación y Docencia Económicas, México, D.F.
- López-Morales, C., (2008), "Discounting the future and the marginal damage costs of CO₂ emissions: Reducing the uncertainty," *Creating sustainability within our midst. Challenges for the 21st century, Proceedings of the 2007 Conference of the United States Society for Ecological Economics*, Pace University Press, New York.
- Maier-Reimer, E. and K. Hasselman (1987), "Transport and Storage of CO₂ in the Ocean -An Inorganic Ocean-Circulation Carbon Cycle Model," *Climate Dynamics* 2, p. 63-90.
- Nordhaus, W. (1992), "An Optimal Transition Path for Controlling Greenhouse Gases," *Science, New Series* 258 (5086), pp. 1315-1319.

