

Javier Andrés*
Rafael Doménech**
Francisca Herranz-Báez*

MODELIZACIÓN DE LOS EFECTOS MACROECONÓMICOS DEL CALENTAMIENTO GLOBAL

En este artículo realizamos una panorámica de los modelos macroeconómicos medioambientales que abordan los costes económicos del cambio climático, y simulan los efectos de las políticas con las que reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, mediante impuestos medioambientales que reflejen el coste social del carbono y las inversiones en nuevas tecnologías que permiten reducir o capturar las emisiones de CO₂ y producir energía verde. En el artículo también se resumen los principales resultados de la investigación empírica que, utilizando distintas metodologías econométricas, estima los efectos económicos del cambio climático y de la imposición medioambiental.

Modelling the macroeconomic effects of global warming

This article provides an overview of environmental macroeconomic models that address the economic costs of climate change and simulate the effects of environmental taxes and incentives to clean technologies to reduce greenhouse gas emissions. The article also summarises the main results of empirical research that, using different econometric methodologies, estimates the economic effects of climate change and environmental taxation.

Palabras clave: cambio climático, calentamiento global, transición energética, modelización.

Keywords: climate change, global warming, energy transition, modelling.

JEL: H23, O13, Q51, Q54.

* Universidad de Valencia.

Contacto: javier.andres@uv.es y francisca.herranz@uv.es

** BBVA Research y Universidad de Valencia.

Contacto: r.domenech@bbva.com

Los autores agradecen los comentarios recibidos de J. E. Boscá, J. Ferri y J. Cubero, y la ayuda de los proyectos PID2020-116242RB-I00 del Ministerio de Ciencia e Innovación de España (MCIN/AEI/10.13039/501100011033), GVPROMETEO2020-083 de la Generalitat Valenciana y TED2021-132629B-I00 del MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y «European Union Next Generation EU/PRTR».

Versión de junio de 2023.

<https://doi.org/10.32796/ice.2023.932.7664>

1. Introducción

Durante los dos últimos siglos, nuestras economías han vivido a espaldas de la sostenibilidad medioambiental y del cambio climático, sin internalizar el coste del deterioro de los recursos naturales ni la emisión de carbono a la atmósfera (Mokyr, 2018). Sin embargo, cada vez se dispone de más y mejor información sobre el impacto de la actividad humana en la concentración de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera y sus efectos sobre el calentamiento global. Las emisiones de gases de efecto invernadero durante algo más de un siglo han provocado que la temperatura media entre 2011 y 2022 haya sido 1,1 °C superior a la observada entre 1850 y 1900 (IPCC, 2023; Huber y Knutti, 2012; Andrés y Doménech, 2020).

Al mismo tiempo, se acumula evidencia sobre los efectos del cambio climático sobre el crecimiento económico, la riqueza y el bienestar de nuestras sociedades. Esta evidencia apunta a que los efectos son bastante heterogéneos por países y grupos de población, con las consiguientes consecuencias significativas en términos de equidad y sostenibilidad social. El cambio climático es un fenómeno global que afecta a la economía de muchas maneras.

En este artículo nos centramos en la modelización de los efectos del calentamiento global causadas por las emisiones de gases de efecto invernadero y por la transición energética sobre las principales magnitudes agregadas de la actividad económica (como el PIB, el empleo, la inflación o la deuda pública) y el bienestar. Dejamos por ello de lado otros efectos específicos, también muy importantes, del cambio climático como, por ejemplo, su incidencia sobre la salud, la esperanza de vida, la regresión de las costas o los impactos sobre sectores como la agricultura. Por transición energética nos referimos a la progresiva sustitución de energías contaminantes, marrones y de origen fósil, a otras fuentes limpias o verdes, que no generan emisiones directamente. Tampoco abordamos otros efectos del deterioro medioambiental, como

ciertos desastres naturales¹, ni estudiamos otras medidas destinadas a frenar el cambio climático más allá de las que se ocupan de reducir el volumen de emisiones de CO₂ a niveles compatibles con los objetivos del Acuerdo de París de 2015.

En concreto, en este artículo realizamos una panorámica de los modelos macroeconómicos medioambientales que abordan los efectos económicos del cambio climático, y simulan los efectos de las estrategias para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, por ejemplo, mediante impuestos medioambientales que reflejen el coste social del carbono y las inversiones en nuevas tecnologías que permiten reducir o capturar las emisiones de CO₂ y producir energía verde. También resumimos los principales resultados empíricos sobre los efectos económicos del cambio climático y de la imposición medioambiental. Esta panorámica es obligadamente selectiva debido a que la literatura teórica y empírica sobre los efectos macroeconómicos del calentamiento global está en una fase de crecimiento exponencial.

La estructura de este artículo es la siguiente. En el segundo apartado se describen las principales aproximaciones macroeconómicas de modelización medioambiental con modelos de evaluación integrados (IAM), desde sus primeras generaciones basadas en la metodología del equilibrio general computable (CGE) a enfoques en donde la estructura económica es más consistente, interna y dinámicamente, con la de los modelos de crecimiento y los modelos dinámicos de equilibrio general estocástico (E-DSGE). En el tercer apartado se presenta una revisión de las principales estimaciones econométricas de los efectos económicos del cambio climático y la imposición medioambiental, mediante modelos de datos de panel, vectores autorregresivos, proyecciones locales o análisis de casos particulares. El último apartado presenta las principales conclusiones de este trabajo.

¹ Un *survey* reciente sobre la modelización y cuantificación de los desastres naturales puede verse en Botzen *et al.* (2019).

2. Modelos macroeconómicos del cambio climático

Estudios científicos cada vez más completos y precisos están dando a conocer que la interacción bidireccional entre el cambio climático y la actividad económica es compleja y multidimensional. Los modelos macroeconómicos del cambio climático suponen una importante contribución a este esfuerzo, ya que integran el análisis de los efectos de la actividad productiva en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), en el aumento de las temperaturas y en el clima, con el estudio de las consecuencias potenciales del cambio climático sobre la economía.

Los modelos económicos del cambio climático nos sirven para ordenar y simplificar esta compleja interacción que opera a través de multitud de canales diferentes, con diversos grados de importancia. Su marco conceptual y metodológico es muy útil para acotar y destacar los mecanismos más importantes que condicionan la relación entre el calentamiento global y la evolución del PIB y, en particular, aquellos canales sobre los que la acción de las distintas políticas económicas puede ser más efectiva. Además, son necesarios para dar respuesta a diversas cuestiones o para construir contrafactuales sobre los que hay poca evidencia histórica, como son los efectos económicos de las distintas estrategias y políticas alternativas diseñadas para reducir las emisiones de GEI. Estos ejercicios se pueden extender al análisis de la transición hacia energías renovables y sistemas productivos sostenibles, y al de las medidas de mitigación de los efectos del cambio climático sobre nuestras sociedades. En definitiva, los modelos económicos constituyen un marco para evaluar proyecciones, analizar estrategias que maximizan el bienestar y evitar la posible incoherencia de combinaciones de distintas políticas (Blanchard *et al.*, 2022).

Los modelos macroeconómicos del cambio climático, conocidos genéricamente como modelos integrados de evaluación (IAM), son modelos agregados, que van desde extensiones del marco básico de equilibrio general computable, como es el caso de la mayoría de los IAM, a otros contruidos a partir de modelos de crecimiento exógeno

(Tsigaris y Wood, 2016) o endógeno (Dietz y Stern, 2015), hasta las extensiones de los modelos dinámicos de equilibrio general estocástico (Annicchiarico *et al.*, 2021), que permiten también captar la interacción en el corto y medio plazo entre la calidad y las políticas medioambientales y las políticas de estabilidad macroeconómica.

Las principales diferencias entre los distintos modelos se deben a los supuestos de endogeneidad de determinadas variables (como, por ejemplo, la inversión, el consumo o el progreso técnico), el nivel de desagregación sectorial, los instrumentos de la política medioambiental (fiscalidad y derechos de emisiones o subvenciones a inversiones sostenibles y energías verdes), los canales de influencia del cambio climático sobre la actividad económica (por ejemplo, la tasa de crecimiento de la productividad total de los factores, el *stock* de capital, los canales financieros o la utilidad social y del consumidor representativo), y la dimensión temporal (efectos del calentamiento global a largo plazo, y los riesgos de transición a medio plazo, Batten, 2018).

Junto a la parte del modelo que describe las relaciones entre los principales agregados económicos (producción, empleo, precios, etc.) a través de ecuaciones de comportamiento, restricciones tecnológicas y condiciones de equilibrio, los cuatro componentes principales de los modelos macroeconómicos de cambio climático son: *i)* la función de daños económicos debidos al cambio climático; *ii)* la relación entre emisiones y actividad económica en la función de acumulación de carbono en la atmósfera; *iii)* la evolución de las emisiones y los costes de mitigación y su relación con el progreso técnico y la energía; y *iv)* una función de bienestar que integra, junto a otros indicadores económicos y sociales, el coste económico del cambio climático a lo largo del tiempo y de las políticas de reducción de emisiones.

La función de daños económicos debidos al cambio climático

Un componente central de los modelos económicos de cambio climático es el supuesto de que la producción

de bienes y servicios está condicionada por un daño causado por la concentración de GEI en la atmósfera (S). En general, esta concentración de gases se aproxima por su equivalente en términos de CO_2 .

El nivel de producción de un país (Y) se aproxima por una función de producción que depende del *stock* de capital (K), el empleo (L) y la productividad total de los factores (A). La productividad aumenta con el progreso técnico, pero disminuye con el nivel de concentración de carbono en la atmósfera (S). Este efecto viene recogido por la función de daños $D(S)$, que aproxima la relación entre el carbono en la atmósfera (así como su volatilidad y la probabilidad de sucesos climáticos extremos) y el nivel de producción agregado²:

$$Y_t = (1 - D(S_t))A_t F(K_t, L_t) \quad [1]$$

Aunque existe bastante incertidumbre respecto a muchos de los elementos de esta función (por ejemplo, el grado de absorción del carbono por la naturaleza y los océanos, el porcentaje que escapa fuera de la atmósfera, o cómo el aumento de las temperaturas afecta a la variabilidad del clima), se considera que los daños crecen más que proporcionalmente con la concentración de carbono en la atmósfera, de manera que D suele aproximarse mediante una función exponencial (por ejemplo, Nordhaus, 2007).

En otras especificaciones, la función D establece una relación entre el daño económico y la temperatura global (T), y una segunda función determina la relación entre la concentración de carbono en la atmósfera y la temperatura global. En cualquier caso, las implicaciones de ambas alternativas son equivalentes. Por ejemplo, Golosov *et al.* (2014) aproximan la siguiente relación

entre el aumento de temperaturas y la concentración de carbono de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$T_t = \lambda \ln\left(\frac{S_t}{S_0}\right) / \ln(2) \quad [2]$$

en donde S_0 es la concentración de carbono en la atmósfera en el periodo que sirve de referencia (por ejemplo, de 1850 a 1900) y λ se calibra habitualmente a 3,0, lo que implica que doblar la concentración de emisiones en la atmósfera respecto a S_0 aumenta la temperatura global en $3,0^\circ\text{C}$.

En 2022 la concentración de CO_2 fue de 418,6 partes por millón (véase NOAA, 2022), lo que equivale a 891,5 gigatoneladas (Gt) de carbono en la atmósfera (1 ppm de volumen en la atmósfera de CO_2 equivale a 2,13 Gt de carbono, véase O'Hara Jr., 1990). En la Figura 1 se ha representado la desviación de la temperatura respecto al promedio entre 1850 y 1900, y de la concentración del carbono en la atmósfera, medido como en el lado derecho de la Ecuación [2], es decir, $\ln(S_t/S_0)/\ln(2)$, en donde la concentración de carbono promedio entre 1850 y 1900 fue $S_0 = 616,3$ Gt. También se muestran los resultados de la estimación del parámetro λ en esta ecuación. Como puede observarse, se estima un valor de λ próximo a 2,2 e inferior al propuesto habitualmente (3,0).

Respecto a los efectos del aumento de la temperatura global sobre la economía mundial, Nordhaus (1977) hace depender la función agregada de daños de la temperatura al cuadrado y la aproxima mediante la siguiente función⁴:

$$1 - D(T_t) = \frac{1}{1 + \theta T_t^2} \quad [3]$$

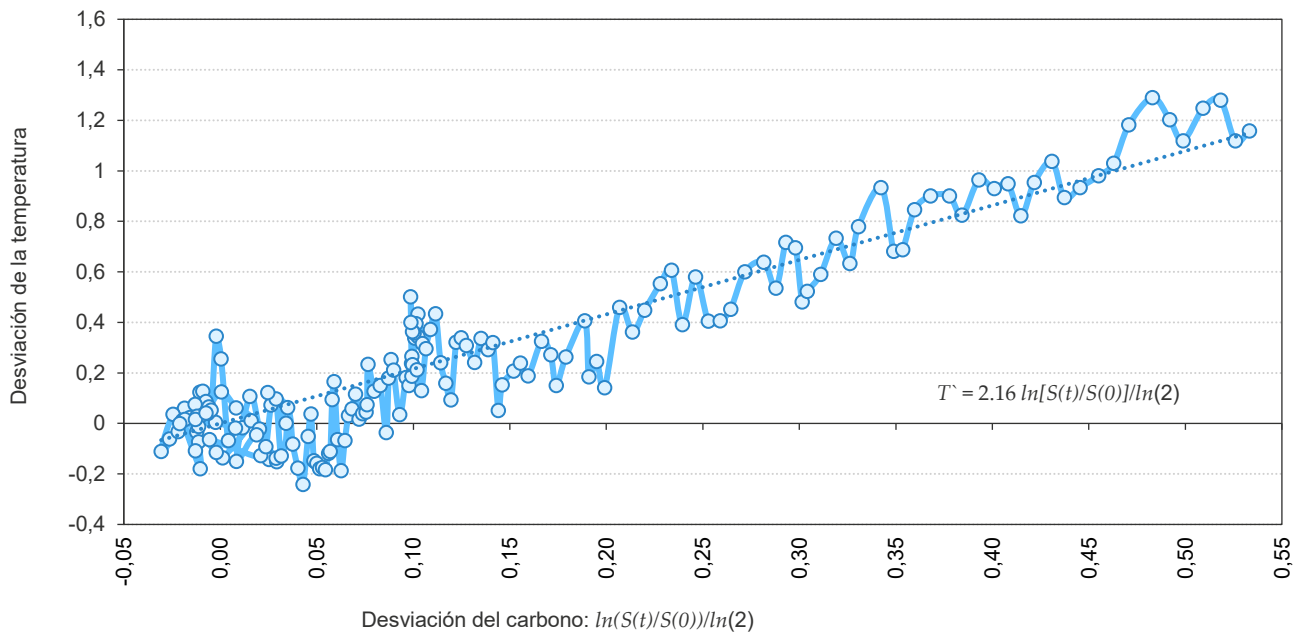
² De manera complementaria a este efecto sobre la productividad total de los factores, se puede considerar que el cambio climático lleva asociados episodios de clima extremos que causan daños físicos directos sobre los factores productivos, es decir, sobre el *stock* de capital productivo o el capital humano (véase, por ejemplo, Stern, 2013).

³ La relación entre concentración de carbono y temperatura es empírica y refleja un fenómeno físico, pero no es exacta por las diferencias en la disponibilidad de datos (longitud, granularidad o estaciones meteorológicas de medición) o en la forma funcional estimada (véase Hausfather, 2018).

⁴ En su modelo DICE Nordhaus (2013) utiliza un valor de θ igual a 0.00267.

FIGURA 1

DESVIACIÓN DE LA TEMPERATURA DE 1950 A 2022 RESPECTO AL PROMEDIO ENTRE 1850 Y 1900, Y DE LA CONCENTRACIÓN DEL CARBONO EN LA ATMÓSFERA



FUENTE: Elaboración propia en base a NOAA.

Es importante tener en cuenta que esta función resume de una manera muy estilizada y agregada el impacto del cambio climático, ya que los efectos económicos varían significativamente entre sectores y países. Los IAM suelen hacer esta distinción y para cada región o país (i), y sector (j) se recopilan estudios sobre los efectos potenciales en la economía que se utilizan para calibrar la función de daños $D_{ij}(T_t)$. Por ejemplo, además de los escenarios de cambio climático, el informe de síntesis de cambio climático AR6 (IPCC, 2023) utiliza los escenarios de [Shared Socioeconomic Pathways](#)⁵ (véase Riahi *et al.*, 2017) que, en los diferentes IAM utilizados (AIM, IMAGE, MESSAGE-GLOBIOM,

WITCH y GMAM), evalúa los efectos sobre 32 países o regiones mundiales en los que se reparte la población mundial, con diferencias en los impactos espaciales del cambio climático.

Utilizando las ecuaciones anteriores, es posible establecer una relación entre la pérdida de PIB y el aumento de concentración del carbono en la atmósfera. Si definimos el PIB_{at} como el Producto Interior Bruto que observaríamos en ausencia de daños por el cambio climático, tenemos que:

$$PIB_t = [1 - D(T_t(S_t - S_0))]PIB_{at} \quad [4]$$

Golosov *et al.* (2014) proponen aproximar esta función de daños mediante una función exponencial en $\hat{S}_t = S_t - S_0$, es decir:

⁵ <https://secure.iiasa.ac.at/web-apps/ene/SspDb/dsd?Action=htmlpage&page=about>

$$PIB_t = e^{-\gamma \hat{S}_t} PIB_{at} \quad [5]$$

en donde $\frac{\partial PIB_t}{\partial \hat{S}_t} \frac{1}{PIB_t} = -\gamma$ indica en qué porcentaje disminuye el PIB por cada gigatonelada de aumento de la concentración de carbono respecto a su nivel preindustrial. En particular, calibran $\gamma = 0.000053$, de manera que triplicar la concentración de carbono respecto a su nivel preindustrial supondría una pérdida de un 6 % del PIB.

La especificación preferida en el metaanálisis realizado por Howard y Sterner (2017), tras corregir por diversos sesgos, implica que una anomalía de las temperaturas de 3 °C por encima de su promedio preindustrial provocaría daños no catastróficos entre el 7 y el 8 % del PIB, daños que aumentan hasta el intervalo entre el 9 y el 10 % cuando se tienen en cuenta los riesgos catastróficos.

Tol (2022) actualiza los resultados de su metaanálisis de 2009 y 2018 (Tol, 2009, 2018), incorporando nuevos estudios y las panorámicas de Nordhaus y Moffat (2017), y Howard y Sterner (2017), con algunas correcciones sobre este último estudio. Sus resultados indican que, aunque el calentamiento global puede tener algún efecto beneficioso por sectores y/o regiones, su impacto neto es siempre negativo, aunque inferior a los de Howard y Sterner (2017).

En la Figura 2, se comparan estas estimaciones de la relación entre los daños sobre el PIB del cambio climático para distintos aumentos de la temperatura global respecto a su promedio preindustrial, que obtienen los metaanálisis de Howard y Sterner (2017) y Tol (2009 y 2022). También incluimos la función de daños del modelo DICE de Nordhaus (2013), muy similares a los de Golosov *et al.* (2014).

Conviene destacar que, dependiendo del modelo, la función de daños puede tener implicaciones económicas muy distintas. Las estimaciones de la función de daños en metaanálisis incluyen estudios de naturaleza muy diferente. En unos casos, estas estimaciones se basan en los efectos estimados mediante

modelos econométricos. En otros, son la función de daños que afecta a la productividad total de los factores (PTF) que, en los modelos de equilibrio general, se ven amplificadas por sus efectos sobre la acumulación de capital. Por ejemplo, en Heutel (2012) o Annicchiarico y Di Dio (2015), con una función de daños en la que duplicar la concentración de carbono en la atmósfera disminuye la PTF un 2,5 %, encuentran que es posible obtener efectos a largo plazo acumulados con una caída del 10 % del PIB. A pesar de unos efectos sobre la PTF relativamente pequeños, el coste de las emisiones acumuladas en términos del PIB es mucho mayor. Weitzman (2012) es más pesimista en el impacto de la temperatura global y el PIB y propone un modelo que capta este efecto incluso para valores moderados de T :

$$1 - D(T_t) = \frac{1}{1 + \left(\frac{T}{20.46}\right)^2 + \left(\frac{T}{6.081}\right)^{6.754}} \quad [6]$$

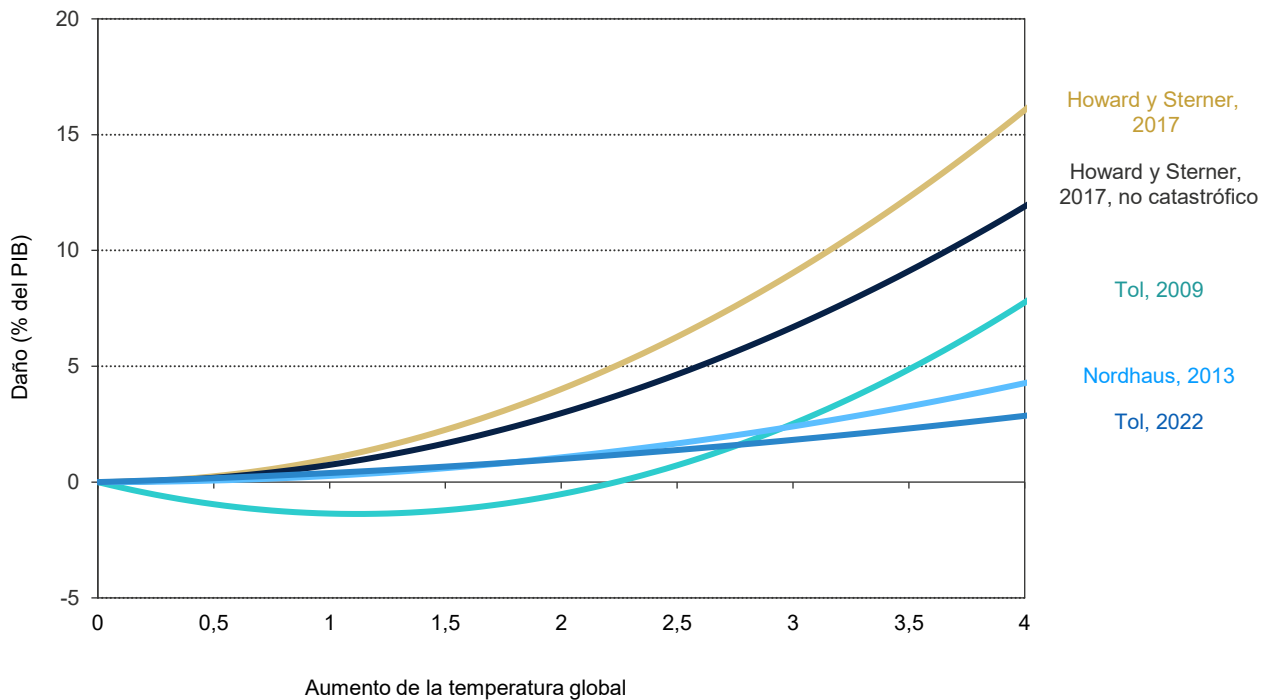
A modo de resumen podemos decir que las funciones de daños apuntan, sobre todo para aumentos de temperatura de 3 °C en adelante, a efectos negativos significativos sobre el PIB, aunque con amplios intervalos de incertidumbre.

La acumulación de carbono en la atmósfera

Además de incluir una ecuación que capta los efectos de la acumulación de carbono sobre la actividad económica, el segundo ingrediente importante de los modelos macroeconómicos de cambio climático es la relación que representa los efectos en la dirección contraria, es decir, de la actividad económica a las emisiones y a la acumulación de carbono en la atmósfera.

La dinámica de acumulación de gases de efecto invernadero y el ciclo atmosférico del carbono es muy compleja, y constituye un ámbito en el que los economistas tenemos poco que decir respecto a otras disciplinas científicas. A pesar de los avances de las últimas décadas, todavía hay alguna incertidumbre sobre la intensidad de la retroalimentación del cambio de las

FIGURA 2
FUNCIONES DE DAÑOS Y AUMENTO DE TEMPERATURAS



FUENTE: Elaboración propia en base a Howard y Sterner (2017), Tol (2009 y 2022) y Nordhaus (2013).

temperaturas y el clima, sobre la acumulación y vida de los gases de efecto invernadero en la atmósfera. Todas estas incertidumbres hacen que el IPCC construya aproximadamente unos 3.000 escenarios climáticos para las próximas décadas.

En el modelo DICE de Nordhaus, el ciclo del carbono aparece representado por tres ecuaciones dinámicas lineales. La primera representa la evolución del carbono en la atmósfera, que depende de su depreciación, del que se expulsa a la biosfera, de la capacidad de absorción de la Tierra (principalmente a través de la superficie de los océanos), y de las emisiones realizadas por la actividad económica. La segunda ecuación refleja la evolución de acumulación de carbono en la superficie del océano, que a su vez depende del existente

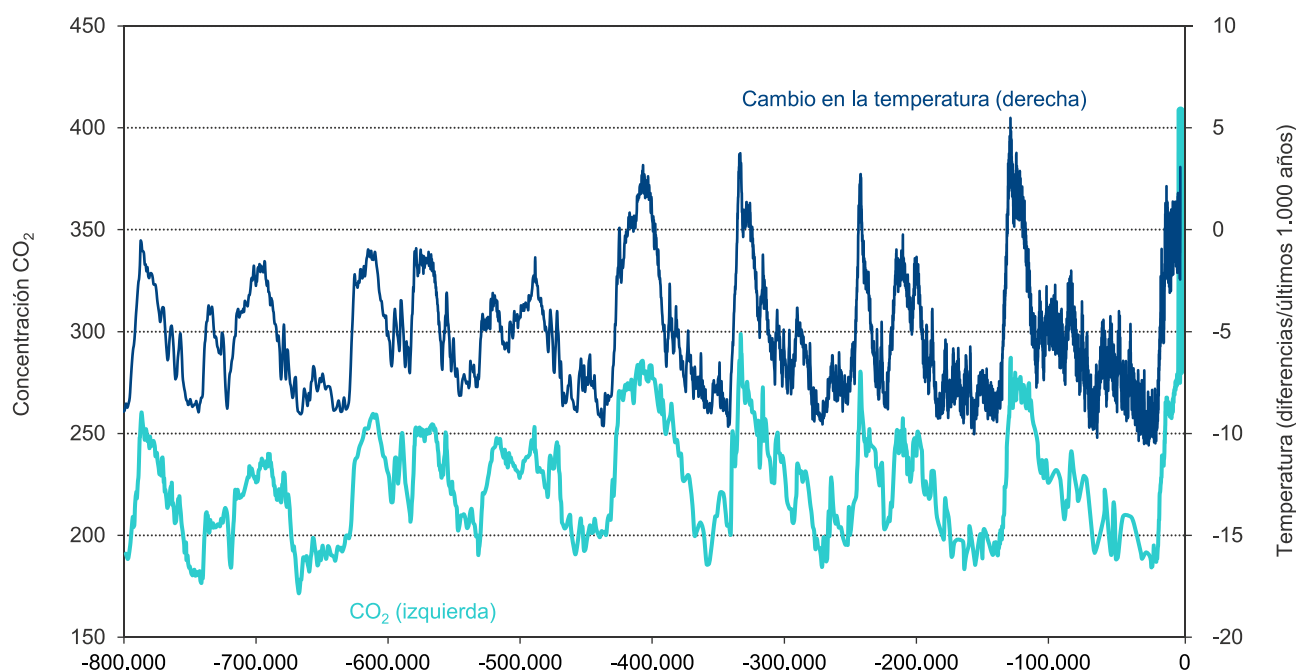
en la atmósfera y del que circula hasta el océano profundo. La tercera ecuación refleja la concentración del carbono en el océano profundo y la circulación con la superficie del océano.

Estos procesos son sumamente lentos y están influidos por mecanismos que no son bien conocidos, como el grado de acidificación de los océanos, la congelación del permafrost y la temperatura global a partir de la que liberaría el metano almacenado, o la presencia de dinámicas no lineales cuando se sobrepasan determinados umbrales de temperaturas y de concentración de carbono.

La evidencia de los últimos 800.000 años es que la acumulación de CO₂ en la atmósfera (Figura 3) y de otros gases de efecto invernadero ha sido estacionaria en el tiempo, pero no constante, es decir, ha ido

FIGURA 3

CAMBIO DE LA TEMPERATURA GLOBAL Y CONCENTRACIÓN DE CO₂ EN LA ATMÓSFERA EN LOS ÚLTIMOS 800.000 AÑOS



FUENTE: Elaboración propia a partir de Jouzel *et al.* (2007), Lüthi *et al.* (2008) y NOAA (<http://t.ly/R32->). Muestra de hielo en la Antártida, programa EPICA. Concentración de CO₂ en Mauna Loa desde 1959.

oscilando, pero sin presentar un comportamiento tendencial. Sin embargo, esta evidencia también nos indica que, desde que se dispone de datos, nunca antes ha habido una concentración tan elevada de CO₂ en la atmósfera.

Frente a la complejidad del ciclo del carbono en el modelo DICE de Nordhaus, muchos modelos optan por alternativas más sencillas. En Golosov *et al.* (2014) la concentración de carbono depende de su nivel preindustrial y de la permanencia de las emisiones realizadas desde entonces. Se supone que, dada la dimensión temporal del modelo, una fracción de estas emisiones permanece en la atmósfera (aunque pueda disminuir en miles de años), otra parte de las emisiones se absorbe

por los océanos o escapa de la atmósfera a la biosfera, y una tercera parte disminuye a una tasa de depreciación geométrica.

Una simplificación adicional en modelos como los de Heutel (2012), Annicchiarico y Di Dio (2015) o Andrés, Boscá *et al.* (2023) consiste en suponer que la concentración de carbono en la atmósfera (S) sigue el siguiente proceso:

$$S_t = \eta S_{t-1} + e_t \quad [7]$$

en donde e son las emisiones. El parámetro η capta de forma simplificada algunos de los procesos de acumulación mencionados y se calibra en función de la

vida media $(-\ln(2)/\ln(\eta))$ del carbono en la atmósfera o, alternativamente, del tiempo necesario $(1/(1-\eta))$ para alcanzar un nuevo estado estacionario con emisiones y concentración de carbono constante. Por ejemplo, en un modelo de periodicidad anual $\eta = 0,99$ permite alcanzar el nuevo estado estacionario en 100 años.

Otro aspecto relevante para la modelización de la acumulación de carbono tiene que ver con si el modelo es para la economía mundial o para una región o país. En el último caso, cuando se analiza el impacto de diferentes políticas que afectan a las emisiones de un país, es importante plantear el supuesto de si las emisiones del resto del mundo se mantienen constantes o evolucionan como las del país analizado. Para el análisis a corto y medio plazo en un país en particular, la exogeneidad de las emisiones del resto del mundo es un supuesto razonable. Si lo que se pretende es analizar el efecto en las dos direcciones entre el calentamiento global y la actividad económica hay que hacerlo en modelos globales (con PIB mundial o multipaís). En caso contrario, solo estaríamos analizando el efecto que la transición energética tiene sobre un país, pero no el impacto del país en el calentamiento global, ni cómo la reducción de emisiones contribuye a evitar escenarios catastróficos con pérdidas significativas de bienestar.

Emisiones, energía, costes de mitigación y progreso técnico

La mayor parte de las emisiones de gases de efecto invernadero se concentran en determinadas actividades. De acuerdo con los datos de Lamb *et al.* (2021), la producción de energía (34,2 %), el uso de combustibles fósiles en el sector industrial (24,5 %) y el transporte (14 %) concentraron el 72,7 % de las emisiones globales de GEI en 2018, mientras que la agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra (21,3 %) y la construcción (5,7 %) contribuyeron con el resto (véase [OurWorldinData](https://ourworldindata.org/emissions-by-sector), 2023)⁶.

En los modelos multisectoriales (principalmente modelos computables de equilibrio económico) las emisiones están determinadas por la producción de cada sector, de manera que las tablas *input-output* permiten calcular la huella de carbono de la demanda final de bienes y servicios (véase, por ejemplo, Barrutiabengoa *et al.*, 2022). Las intensidades energéticas de cada sector pueden cambiar en el tiempo, en función del progreso técnico, y las emisiones por unidad de energía consumida cambian en función del mix energético utilizado.

La manera más sencilla de explicar la evolución de las emisiones (e) es suponer que son una función creciente y cóncava del PIB (y) con parámetros cambiantes en el tiempo y específicos para cada país:

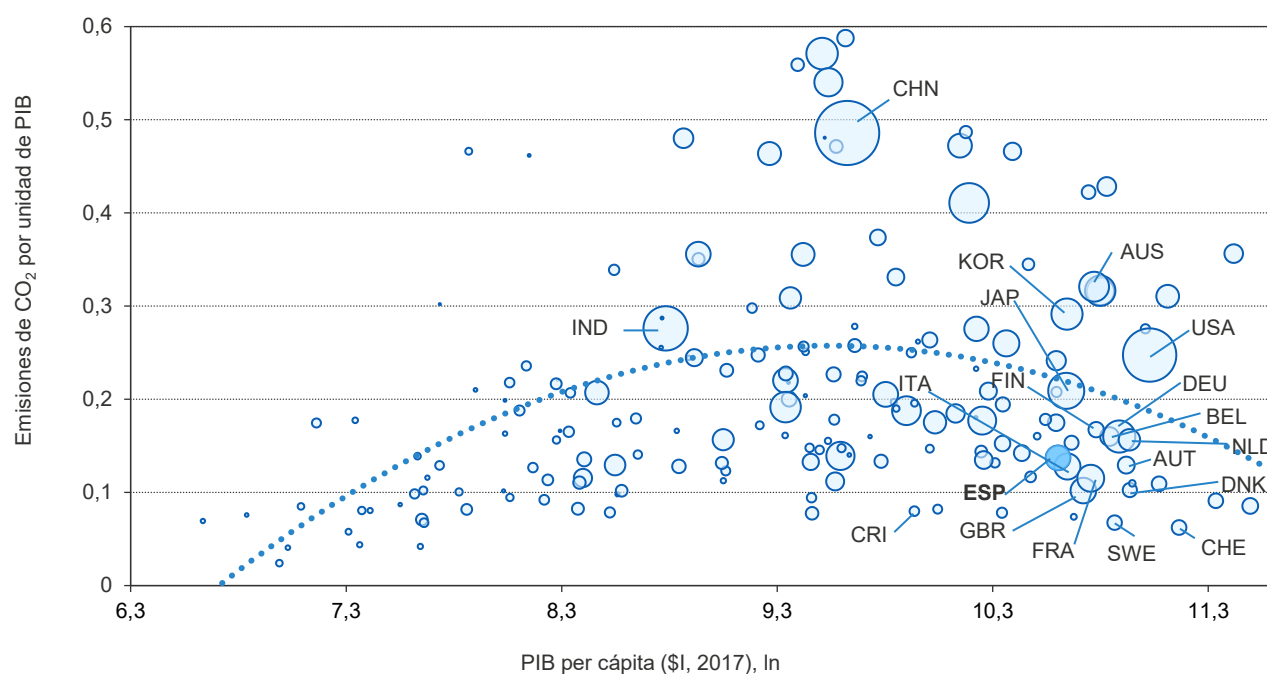
$$e_{it} = (1 - \mu_{it}) \lambda_{1it} y_{it}^{\lambda_{2it}} \quad [8]$$

en donde μ es la fracción de emisiones que la economía reduce de forma endógena por unidad de producción (como discutimos más adelante), λ_1 es un factor de escala y λ_2 mide la elasticidad y concavidad de las emisiones al PIB. Esta forma funcional es suficientemente flexible para captar la evidencia espacial y temporal de la relación entre emisiones y PIB.

En la Figura 4 se presenta la relación para 2018 entre el PIB per cápita (en paridad de poder de compra y dólares internacionales de 2017) y las emisiones totales de CO₂ por unidad de PIB, para todos los países con datos disponibles. El tamaño de cada círculo es función de las emisiones totales de CO₂ de cada economía. De la evidencia de esta figura pueden extraerse varias conclusiones. La primera es que la correlación entre PIB per cápita e intensidad de CO₂ es, en promedio, positiva hasta niveles del 25 % de la renta per cápita de Estados Unidos, como la de China. A partir de ese nivel se empieza a apreciar una relación negativa entre ambas variables. La segunda es que esta curva con forma de U invertida muestra que las emisiones de CO₂ aumentan más rápidamente que la renta en las primeras fases de desarrollo y más lentamente cuando se alcanzan niveles de PIB per cápita más elevados, lo que permite disminuir

⁶ <https://ourworldindata.org/emissions-by-sector>

FIGURA 4
PIB PER CÁPITA Y EMISIONES DE CO₂ POR UNIDAD DE PIB, 2018



FUENTE: Elaboración propia a partir de Banco Mundial y OurWorldinData. El tamaño de cada círculo es función de las emisiones totales de CO₂ de cada país.

la intensidad de las emisiones. Además, hay diferencias significativas entre países que no tienen mucho que ver con el nivel de desarrollo sino con las preferencias, la dotación de recursos naturales, la composición sectorial o los impuestos a las emisiones. Así, como se observa en la Figura 4, países ricos como Suecia o Suiza emiten los mismos niveles de CO₂ por unidad de PIB producida que algunas de las economías con menor renta per cápita del planeta, y la cuarta parte de la de EE UU, con un nivel de desarrollo similar.

Dada la importancia del mix energético y del progreso técnico en la intensidad energética, muchos modelos agregados (por ejemplo, Golosov *et al.*, 2014, Acemoglu *et al.*, 2012, o Andrés, Boscá *et al.*, 2023), distinguen entre dos tipos de energía (verde o limpia, y marrón o

contaminante) como *inputs* en la función agregada de producción. Esta distinción permite analizar mecanismos alternativos mediante los cuales es posible reducir la contribución de la actividad económica al aumento de las emisiones de CO₂. En primer lugar, el progreso técnico permite disminuir la intensidad energética o mejorar su eficiencia en la producción de bienes y servicios, es decir, que la producción requiere menores cantidades de energía por unidad de PIB. En segundo lugar, las innovaciones también facilitan la reducción de las emisiones de los combustibles fósiles mediante tecnologías de captura del carbono. En tercer lugar, las innovaciones en energías renovables o verdes permiten reducir su coste de producción, inclinando así el mix energético óptimo hacia uno que reduce las emisiones por unidad de

energía consumida. Por último, las inversiones en adaptación al cambio climático permiten mitigar el impacto de la actividad económica sobre las emisiones.

Juntando todas las piezas en los modelos económicos de cambio climático

Desde una perspectiva macroeconómica agregada, el componente económico de los modelos de cambio climático puede ser muy variado, aunque hay tres tipos de enfoques fundamentales. Los modelos de evaluación integrados (IAM) incorporan a un modelo dinámico y agregan los módulos medioambientales discutidos anteriormente. Uno de los primeros modelos de cambio climático fue el modelo DICE, acrónimo en inglés de modelo Dinámico Integrado de Economía del Clima propuesto por Nordhaus (1992), que tuvo como precursor el modelo de demanda y oferta de energía desarrollado por Nordhaus (1977). El modelo DICE permitía analizar conjuntamente la dinámica de las emisiones de GEI, su concentración en la atmósfera, sus efectos sobre el clima, el crecimiento económico y el coste de las políticas para reducir las emisiones. La versión regional del DICE es el modelo RICE (Regional Integrated model of Climate and the Economy). Estos modelos han experimentado sucesivos cambios y las versiones más recientes llegan prácticamente hasta nuestros días (véase Nordhaus, 2018).

En sus primeras versiones, la estructura teórica de los modelos IAM estaba basada en el enfoque de equilibrio general computable (CGE), en el que la relación entre las variables de producción incorporaba las interacciones *input-output*. Los modelos de equilibrio general computable simulan las interacciones entre diferentes sectores de la economía para evaluar los efectos macroeconómicos de las políticas de cambio climático. Examinan cómo los cambios en un sector, como la energía o la agricultura, afectan a la producción, la composición de la demanda agregada o el empleo y son útiles para analizar los impactos económicos potenciales de los precios, los subsidios o las regulaciones del carbono.

Los modelos IAM-CGE participan de las limitaciones generales de los modelos macroeconómicos medioambientales que comentaremos más adelante. Sin embargo, la metodología CGE tiene algunas limitaciones específicas. La aplicación empírica de estos modelos se basa con frecuencia en la calibración de las principales elasticidades en la matriz *input-output* a partir de estimaciones microeconómicas, que no siempre son consistentes con otros parámetros del modelo, ni con los cambios en los instrumentos de política económica, por lo que no están libres de la crítica de Lucas. Son más útiles para predecir asignaciones de estado estacionario, ya que en algunas de sus versiones la dinámica de las cantidades y la de precios están desconectadas, lo que dificulta su interpretación para cambios de corto y medio plazo. Es cierto que los fenómenos medioambientales transcurren en una dimensión temporal de largo plazo, pero no así los efectos sobre los procesos económicos (producción, empleo, inflación, inversión, etc.) de las políticas económicas aplicadas para favorecer la transición energética.

Además, los modelos IAM-CGE no captan la incertidumbre inherente al proceso económico y a la evolución y efectos del calentamiento global⁷. Como plantea Pindyck (2017) la incertidumbre con la que se afrontan los problemas del cambio climático y su impacto en la economía no es fácil de analizar mediante simulaciones estándar, ya que en lo referente al cambio climático desconocemos incluso la distribución de probabilidad de los principales parámetros del modelo o de los cambios no anticipados. Del mismo modo, estos modelos de largo plazo no incorporan sin embargo la posibilidad de eventos climáticos catastróficos globales o puntos de no retorno (*tipping points*) en los efectos de las emisiones (Pindyck, 2013).

⁷ El BCE distingue entre dos tipos de modelos IAM, en función de la incertidumbre que rodea al sistema climático. Un conjunto de modelos toma como exógenos los objetivos de aumento de temperaturas y de concentración de carbono. En otros, existe incertidumbre sobre el aumento de la concentración de carbono, el incremento de las temperaturas y el daño económico (véase BCE, 2021).

Los modelos de crecimiento económico desarrollados a partir del modelo neoclásico con progreso técnico agregado exógeno (Tsigaris y Wood, 2016) o endógeno (Dietz y Stern, 2015; Stern, 2018; Tsigaris y Wood, 2019) incorporan un marco dinámico y de equilibrio más completo y derivan explícitamente el conjunto de ecuaciones de comportamiento a partir de la maximización de la utilidad esperada y supuestos de comportamiento estándar, imponiendo las restricciones de equilibrio en todos los mercados. Esto asegura la consistencia entre los principales parámetros calibrados del modelo a partir de unos parámetros estructurales profundos, de tecnología o preferencias.

Los modelos IAM basados en el modelo de crecimiento de equilibrio general superan algunas de las limitaciones de los modelos CGE. En primer lugar, permiten la consideración conjunta de diversos tipos de agentes (heterogeneidad tanto entre los hogares como por tipos de empresas), explicitando las relaciones entre ellos, agregándolos de forma natural una función de bienestar social. Además, facilitan la comprensión de las dinámicas económicas a partir de sendas de progreso técnico, tanto en la función de producción del PIB como en la producción de energía.

Una versión de estos modelos es la que incorpora las principales aportaciones de la teoría del crecimiento endógeno, según la cual el aumento de la productividad total de los factores (ya sea agregada o sectorial) no evoluciona de forma exógena, sino que responde a la inversión de los agentes en actividades de I+D, capital humano, etc. En concreto, estos modelos incorporan ecuaciones de acumulación de capital humano, inversión en I+D, generación de ideas, etc., que son susceptibles de moderar la generación de emisiones, pero también de ser afectadas negativamente por el cambio climático, a través de un canal más potente y duradero que los efectos nivel sobre la productividad en modelos IAM-CGE (Dietz y Stern, 2015).

Una versión de los modelos de equilibrio general más adecuada para el análisis de corto y medio plazo la constituyen los Modelos Dinámicos de Equilibrio General Medioambientales (E-DSGE). Estos modelos incorporan

la fundamentación de las decisiones intertemporales de los distintos agentes económicos, la incertidumbre y las imperfecciones del mercado. Annicchiarico *et al.* (2021) describen distintos tipos de los principales modelos existentes en la literatura, como los modelos de ciclo real o los neokeynesianos, en función de la incorporación de rigideces de carácter nominal en precios y/o salarios, y de los supuestos de equilibrio en el mercado de trabajo. Estos modelos también introducen diversos fallos de mercado debidos a la ausencia de algún mercado relevante, fricciones financieras o ausencia de competencia perfecta en los mercados de bienes productos. Estos fallos de mercado son especialmente importantes, ya que interactúan con las medidas de política necesarias para facilitar la transición energética y determinan su impacto sobre la actividad económica y el empleo (Stern, 2022).

Entre las ventajas de estos modelos hay que señalar que permiten el análisis de los efectos de las políticas medioambientales a largo plazo, pero también en el ciclo económico, que pueden ser muy relevantes sobre la producción y el empleo, aunque tardan en manifestarse sobre la temperatura global. Además, incorporan la incertidumbre en forma de *shocks* de distinto tipo, de oferta, de demanda, financieros, de política económica incluida la medioambiental, etc.

El coste social del carbono

Una propiedad muy importante de los modelos IAM en todas sus versiones es que al incorporar una función de utilidad ofrecen una métrica natural para evaluar los efectos del cambio climático y de las políticas medioambientales sobre el bienestar y permiten obtener estimaciones del coste social del carbono.

En general, los modelos dinámicos concluyen que es posible realizar la transición energética hacia economías neutrales en emisiones con costes asumibles y menores al valor presente descontado de los daños asociados a los escenarios de cambio climático sin dicha transición, siempre que sea gradual y tenga lugar en unas pocas décadas. Por el contrario, el coste económico de

no hacer frente al cambio climático supera con creces los de las transiciones energéticas graduales.

Para conseguir esta transición energética con la menor pérdida de bienestar posible, en general, los IAM-CGE como los de crecimiento y los modelos DSGE muestran que es necesario gravar las emisiones de carbono para internalizar sus efectos negativos sobre el cambio climático y la actividad económica, además de acelerar e incentivar la innovación en tecnologías que permitan reducir las emisiones de carbono sin reducir el crecimiento económico, sobre todo, en las economías en desarrollo. Por ejemplo, Acemoglu *et al.* (2012) encuentran que las transiciones energéticas que dependen únicamente de un impuesto al carbono, en lugar de una combinación de impuestos y subsidios, genera pérdidas de bienestar equivalentes al 1,9% del consumo cada año. En el otro extremo, Hassler *et al.* (2020) muestran que basar la transición energética exclusivamente en subvenciones es una estrategia muy arriesgada, ya que es poco probable que pueda frenar el calentamiento global. Como apuntan Andrés, Barrutiabengoa *et al.* (2023) la combinación de ambos tipos de políticas, subvenciones a tecnologías reductoras de emisiones e impuestos sobre el carbono, produce los mejores resultados en términos de bienestar social.

Estos resultados son esperanzadores puesto que indican que el crecimiento económico de los países en desarrollo es tecnológica y económicamente factible con el mantenimiento o incluso reducción de sus emisiones de CO₂ per cápita, como muestra la Figura 4. Como sostiene Stiglitz (2019), la sostenibilidad medioambiental no implica que los países en desarrollo tengan que renunciar a alcanzar los niveles de vida de las sociedades más avanzadas si el énfasis se pone en una estrategia apropiada de desarrollo basada en las tecnologías, regulaciones, fiscalidad y financiación adecuadas.

El coste social del carbono (CSC) cuantifica en términos monetarios (normalmente por tonelada de CO₂) los daños económicos asociados a la emisión de gases de efecto invernadero. De manera más precisa, el CSC mide el daño marginal causado por emitir más carbono

a la atmósfera, por lo que es el precio óptimo del carbono. Dependiendo de las características del modelo con el que se estima, el CSC refleja los costes de pérdida de bienestar social causados por daños en la salud, la disminución de la actividad económica, la destrucción de riqueza, la pérdida de biodiversidad y otros efectos económicos adversos atribuibles al cambio climático. Al internalizar los costes económicos asociados a la emisión de gases de efecto invernadero, el CSC tiene las características de un impuesto pigouviano que incentiva la reducción de las emisiones y fomenta la adopción de tecnologías más limpias y sostenibles.

Tol (2023) realiza una revisión de 5.905 estimaciones del CSC en 207 estudios publicados antes de 2022. En la Figura 5 se muestra la media y la desviación típica de las estimaciones del coste social de carbono por año de publicación de todos estos estudios. Desde 2009 las estimaciones muestran una tendencia positiva estadísticamente significativa, de manera que el coste social del carbono aumenta en promedio desde 9 a 40 dólares por tonelada de CO₂, para estimaciones con tasas de descuento elevadas, y desde 122 a 525 dólares por tonelada, para tasas de descuento reducidas.

Golosov *et al.* (2014) proponen una expresión simplificada para el coste social del carbono bajo supuestos bastante plausibles, que es proporcional al PIB corriente y que depende solo de tres factores: la tasa de descuento (β), la elasticidad de daño económico de una unidad adicional de carbono en la atmósfera (γ) y de la depreciación de la concentración de carbono⁸:

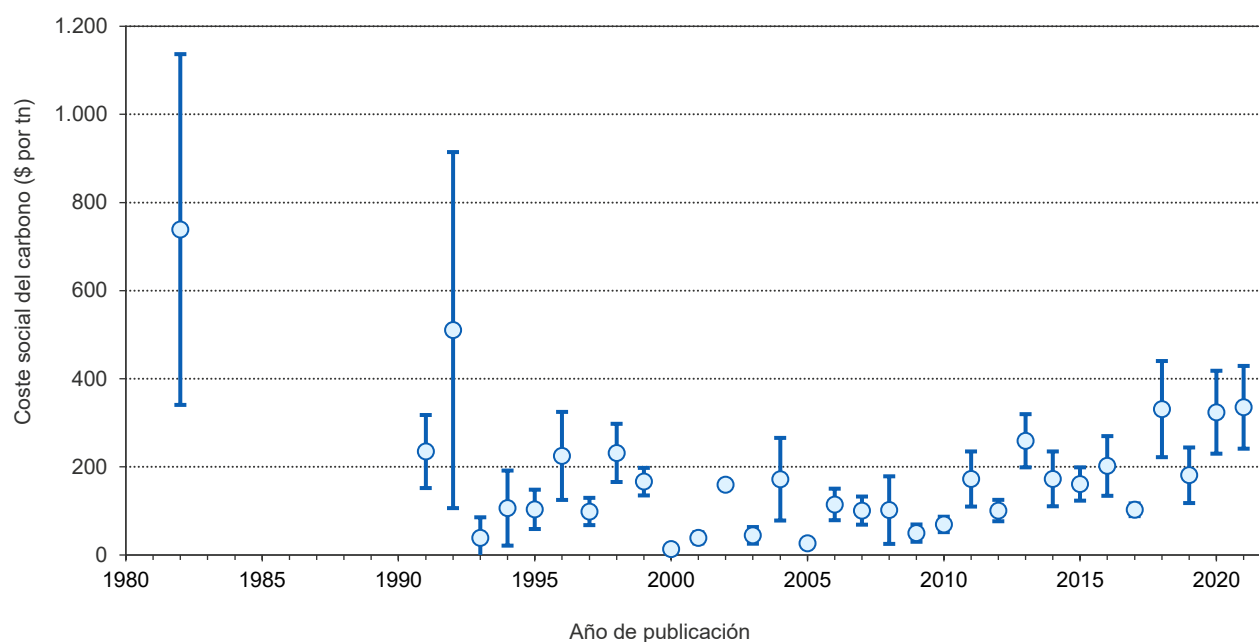
$$CSC_t = Y_t \gamma \left(\frac{\varphi_L}{1 - \beta} + \frac{(1 - \varphi_L)\varphi_0}{1 - (1 - \varphi)\beta} \right) \quad [9]$$

en donde φ_L es la proporción de carbono emitido a la atmósfera que permanece en ella para siempre, φ_0 es la

⁸ Rezai y van der Ploeg (2016) obtienen una expresión similar para el coste social del carbono a partir de un modelo de crecimiento óptimo, aunque con algunos supuestos diferentes.

FIGURA 5

ESTIMACIONES DEL COSTE SOCIAL DEL CARBONO, CORREGIDAS POR INFLACIÓN E INTERVALOS PARA $\pm$ UNA DESVIACIÓN TÍPICA



FUENTE: Elaboración propia a partir de Tol (2023).

proporción de emisiones que no escapan de la atmósfera hacia la biosfera o que no son absorbidas por la superficie del océano y φ es la tasa de depreciación geométrica de las emisiones que permanecen en la atmósfera. Con los parámetros calibrados por Golosov *et al.* (2014) y el PIB mundial de la PWT 10, el coste social del carbono en 2019 habría sido de 104,7 dólares internacionales de 2017 (véase Andrés, Barrutiabengoa *et al.*, 2023).

Sin embargo, el CSC estimado en cada modelo es muy sensible a ciertos supuestos claves de los modelos. Por una parte, a la consideración de la incertidumbre sobre los daños potenciales del cambio climático y de las políticas o medidas de mitigación, la acumulación de GEI y su impacto en el cambio climático, y la evolución de las emisiones y del progreso técnico. Además, a la forma de la función de daño incorporada al modelo,

al factor de descuento, es decir, cómo se valoran los daños presentes en relación con los daños futuros y a la presencia o no de *tipping points* y a los efectos no lineales del clima sobre la actividad económica. Todo ello hace que diferentes estudios puedan llegar a estimaciones muy diferentes del CSC.

Dietz y Stern (2015), muestran que el CSC calculado a partir de modelos IAM sobre la base de la calibración del modelo DICE Nordhaus (1993) es reducido, debido a que según la función de daño y otras características del modelo (con una elevada tasa de descuento y un efecto no permanente sobre la productividad), el impacto de la concentración de CO₂ en la atmósfera sobre la producción es moderado. De este modo, la senda de CSC parte de un valor estimado inferior a 50 \$ por tonelada de CO₂ emitida en 2015 e iría aumentando hasta

alcanzar los 106 \$ alrededor de 2050 y los 200 \$ en 2100 (en dólares constantes de 2005). Sin embargo, estos valores aumentan significativamente una vez que el modelo DICE se modifica para incorporar una función de sensibilidad en la que las emisiones de CO₂ tienen un mayor impacto sobre el calentamiento global, una función de daños que refleja una incidencia mayor de la temperatura sobre el PIB (incluso a valores no muy elevados de la misma, como en Weitzman, 2012), así como una función de daños en la que el aumento permanente de la temperatura incide sobre la tasa de crecimiento de la productividad dando así lugar a un efecto negativo permanente sobre su nivel. Sobre la base de estas extensiones, el ritmo de acumulación de CO₂ en la atmósfera y su efecto dañino sobre la producción aumentan sensiblemente, lo que da lugar a un CSC significativamente superior, sobre todo en las primeras décadas de la simulación, para evitar sobrepasar puntos de no retorno medioambiental. Estos valores oscilan entre los rangos 76 \$-233 \$ en 2015, 316 \$-1121 \$ en 2050 y 656 \$-1032 \$ en 2100.

3. Evaluaciones econométricas del cambio climático y la imposición medioambiental

A diferencia de otras áreas de la economía, la evaluación empírica de los efectos del cambio climático o de las políticas de mitigación de sus impactos o de reducción de emisiones es especialmente difícil por diversas razones que hacen que sus resultados deban interpretarse como un trabajo todavía en curso⁹. Por una parte, porque no se dispone de suficiente evidencia empírica que permita obtener resultados robustos sobre muchos de los mecanismos relevantes en la influencia mutua entre el medioambiente y la actividad económica. Tratar de extraer patrones o hechos estilizados de los efectos del cambio climático sobre la actividad económica está

sujeto a una gran incertidumbre. Las altas temperaturas a las que nos exponemos si no frenamos el calentamiento global, no se observan desde hace millones de años, lo que dificulta aún más conocer su efecto en el contexto productivo actual, caracterizado por un fuerte componente industrial, urbano y basado en el transporte. Algo parecido sucede a la hora de estimar el impacto de la producción sobre la temperatura media del planeta.

La información agregada de corte transversal no es con frecuencia muy informativa sobre estas cuestiones. La evidencia de la Figura 4 muestra una enorme heterogeneidad por países en la relación entre el PIB y las emisiones, que se ve ampliada todavía más cuando se añade la dimensión temporal. Los países han seguido trayectorias muy diferentes y controlar por la composición sectorial, la imposición medioambiental o la inversión en tecnologías limpias resulta complejo.

Por último, la extrapolación de la información proporcionada sobre casos particulares de desastres climáticos (que puede ser más rica y directa) a escenarios futuros sobre la variación espacial y temporal del clima y su correlación con el crecimiento económico es también un ejercicio lleno de problemas. Los estudios que proporcionan resultados detallados de cómo el clima influye a corto plazo sobre algunas actividades, sectores, empresas o geografías (por ejemplo, en las estimaciones que resume Auffhammer (2018) o los de evaluaciones realizadas por compañías aseguradoras de eventos climáticos catastróficos), lo hacen para eventos y circunstancias específicos que no aplican por igual en economías con niveles de desarrollo y estructura económicas y sociales muy diferentes. Además, como apuntan Dell *et al.* (2014), a largo plazo, la adaptación, los efectos de equilibrio general y los efectos acumulativos del cambio climático lentos pueden dar lugar a efectos muy diferentes a los estimados en el corto plazo.

Como resultado de las limitaciones anteriores, las proyecciones basadas en resultados empíricos de algunos estudios que no están acotados por las restricciones de los modelos teóricos pueden dar lugar a resultados de dudosa utilidad. Sabemos poco sobre el impacto que

⁹ Un buen ejemplo de estos trabajos en curso lo constituye la panorámica de la Network of Central Banks and Supervisors for Greening the Financial System (NGFS) sobre modelización de los impactos de los riesgos climáticos y de transición (véase NGFS, 2022).

pueden tener los escenarios climáticos más extremos, que todavía no podemos observar en los datos, lo que obliga a tomar con cautela muchas proyecciones a partir de los estudios actualmente existentes. Por ejemplo, Hassler (2023) muestra que la extrapolación de las estimaciones de Burke *et al.* (2018) ante un aumento global de temperaturas de 2,5 °C en 2080 da lugar a resultados poco creíbles como, por ejemplo, que la tasa del crecimiento del PIB per cápita a largo plazo de países como Finlandia (que ha sido en promedio del 3,0 % anual desde 1950) o Suecia (2,4 %) se multiplicaría por 6.

El impacto de las variaciones climáticas en la economía

Dell *et al.* (2014) presentan una panorámica de la literatura empírica sobre la relación entre el cambio climático y la economía, en la que encuentran, en general, una relación negativa y significativa entre la temperatura y la actividad económica. Las perturbaciones climáticas, particularmente por el aumento de las temperaturas, afectan a la producción agrícola e industrial, la demanda de energía, la productividad del trabajo o al crecimiento económico, además de tener consecuencias sobre la salud, las migraciones, los conflictos sociales o, incluso, sobre la estabilidad política. Las magnitudes de los efectos son sustanciales, particularmente entre las economías en desarrollo. Estos autores consideran que, como regla general, de los estudios analizados puede concluirse que cada grado de aumento de la temperatura provoca entre un 1 % y un 2 % de menor PIB en los países de menor renta per cápita. Incluso hay evidencia que apunta a que, más que efectos sobre el nivel, el clima puede tener efectos sobre la tasa de crecimiento de estos países a largo plazo. En las economías más desarrolladas, la sensibilidad a aumentos moderados de la temperatura es mucho menor debido fundamentalmente a su capacidad de adaptación y, en cierta medida, a la situación geográfica de muchos de ellos.

Usando las estimaciones de la productividad total de los factores por países en *Penn World Table*, Letta

y Tol (2019) llegan a conclusiones parecidas a las de Dell *et al.* (2014), con una muestra de 60 países para el periodo 1960-2006. Sus resultados indican que un aumento de la temperatura de 1 °C anual reduce las tasas de crecimiento de la PTF entre 1,1 y 1,8 puntos porcentuales en los países de menor renta per cápita, mientras que el impacto no es significativamente distinto de cero en los países más avanzados.

Kahn *et al.* (2021) calculan cuatro escenarios diferentes dependiendo de la intensidad del aumento y de la capacidad de adaptación de las economías al mismo. Estas proyecciones a 2100 se obtienen utilizando los resultados estimados de los efectos sobre la tasa de crecimiento del PIB per cápita del aumento de las temperaturas para 174 países desde 1960 hasta 2014. Limitar el aumento de las temperaturas en línea con el Acuerdo de París de 2015 situaría este coste entre un 0,6 % y un 1,6 % del PIB per cápita. En el escenario más desfavorable, en el que las temperaturas aumenten 4 grados centígrados en 2100 y el tiempo medio de adaptación fuese de 4 décadas, el coste en términos de PIB per cápita en 2100 sería prácticamente equivalente al 10 % del PIB per cápita de media global y alcanzaría el 14,3 % en EE UU. Estos costes son económicamente relevantes, estadísticamente significativos, y con gran heterogeneidad entre países, pero sin que haya diferencias sustanciales entre economías avanzadas o en desarrollo. En promedio, los costes del cambio climático estimados por Kahn *et al.* (2021) están por encima de los que asumen los modelos DICE de Nordhaus.

Como señalan Dell *et al.* (2014), uno de las limitaciones más importantes de las funciones de daño en los modelos integrados de evaluación (IAM) es que no incorporan la evidencia econométrica más detallada sobre daños climáticos que ha ido apareciendo en las dos últimas décadas. La mayoría de las investigaciones empíricas sobre el coste económico del cambio climático se concentran en el aumento previsto de la temperatura global. Sin embargo, la mayor frecuencia e intensidad de fenómenos meteorológicos extremos

(sequías, inundaciones, olas de calor y frío, o huracanes) dependen también de la volatilidad de las temperaturas y precipitaciones, y no solo de su media.

Una cuestión relevante de estos estudios es si es el nivel o la variación de la temperatura la que afecta a nivel del PIB per cápita o a su tasa de crecimiento. La hipótesis de Dell *et al.* (2014) de que el nivel de temperaturas afecta a la tasa de crecimiento es rechazada por Kahn *et al.* (2021), para quienes la relación correcta debe hacerse con la desviación de las temperaturas o del clima respecto al promedio histórico de cada país, es decir, con la anomalía climática de cada geografía. Kotz *et al.* (2021) llegan a una conclusión similar para el caso de las desviaciones de las temperaturas diarias respecto a su media anual y a su patrón estacional, aunque sus efectos estimados son sobre las tasas de crecimiento del PIB y también se aprecian para las precipitaciones y sequías extremas respecto al patrón histórico de cada geografía (Kotz *et al.*, 2022).

Por el contrario, Kalkuhl y Wenz (2020) concluyen la existencia de efectos nivel, pero no sobre las tasas. Utilizando una muestra de 1.500 regiones para 77 países, no se observan impactos permanentes en la tasa de crecimiento, pero sí evidencia robusta de que la temperatura afecta considerablemente los niveles de productividad. En concreto, un aumento de la temperatura media mundial de unos 3,5 °C en 2100 reduciría el PIB mundial entre un 7 % y un 14 %, también muy por encima de los efectos del modelo DICE.

Newell *et al.* (2021) muestran que, al estimar 800 especificaciones de la relación entre temperatura y PIB per cápita, los modelos con efectos del cambio climático en las tasas de crecimiento generan una incertidumbre considerablemente mayor que los modelos con efectos en los niveles de la renta per cápita. En concreto, en los modelos en tasas de crecimiento, el intervalo de confianza al 95 % de los efectos sobre el PIB per cápita en 2100 va desde -84 % a +359 %. Por el contrario, el intervalo de confianza al 95 % para los modelos en niveles va de -8,5 % a +1,8 %, efectos más consistentes con las funciones de daño de los IAM. Estos

autores también encuentran que, las altas temperaturas causan pérdidas estadísticamente significativas en el nivel del PIB agrícola y de los países en desarrollo, pero no en la producción no agrícola de los países ricos.

Otros estudios han analizado el impacto del aumento de las temperaturas sobre otras variables como, por ejemplo, las horas trabajadas y su distribución. Graff Zivin y Neidell (2014) utilizan datos de panel de trabajadores en condados y áreas metropolitanas de EE UU de 2003 a 2006 para estimar los impactos de la temperatura en la distribución del tiempo y, por lo tanto, sobre la producción de manera indirecta. Por encima de los 29,4 °C, los aumentos extremos de temperatura reducen las horas trabajadas en los sectores más expuestos a las condiciones climáticas. Sin embargo, en la parte baja de la distribución de temperaturas, un aumento de las mismas no tiene efectos sobre las horas trabajadas. Estos autores también encuentran evidencia de la adaptación del tiempo de trabajo a temperaturas elevadas a través de una reasignación de horas hacia periodos con temperaturas más bajas o por la aclimatación.

Como explica Auffhammer (2018), distintos expertos (por ejemplo, Pindyck, 2017) han planteado otras limitaciones adicionales de estos estudios econométricos, más allá de la distinción entre efectos tasa y nivel. El principal problema es que las estimaciones econométricas se limitan a periodos de tiempo relativamente cortos y a cambios acotados del clima. Aunque la heterogeneidad entre países o regiones puede estar reflejando bien la adaptación a largo plazo realizada hasta ahora, es muy probable que los resultados de estos estudios no puedan predecir adecuadamente los efectos de cambios significativos en el clima, de una magnitud muy superior y en periodos de tiempo más cortos a los observados hasta ahora.

Los efectos económicos de los impuestos al carbono

Un segundo tipo de estudios econométricos se han concentrado en estimar los efectos macroeconómicos

de las políticas de mitigación de emisiones, en particular la de los impuestos al carbono. La panorámica de Metcalf (2019) muestra que estos impuestos reducen significativamente las emisiones. Andersson (2019) utiliza el método del control sintético aplicado al transporte en Suecia y encuentra que la introducción de un impuesto al carbono en los combustibles redujo las emisiones en un 6 %, un efecto tres veces superior al obtenido con las elasticidades del precio de la gasolina. Sin embargo, los efectos sobre otras variables económicas, como el PIB, el empleo o la inflación, son más controvertidos, por lo que el coste económico de la imposición al carbono está sujeto a una mayor incertidumbre.

Metcalf y Stock (2020a) utilizan un modelo de proyecciones locales aplicado a un panel de datos, para estimar las innovaciones exógenas en los impuestos sobre el carbono para la muestra de 31 países que forman parte del sistema europeo de comercio de emisiones (ETS), con datos del Banco Mundial, para algunos de ellos desde 1990. Sus resultados indican que no hay evidencia de que la imposición al carbono tenga efectos negativos y estadísticamente significativos sobre el PIB y el empleo, en línea con la experiencia de algunas economías, como señala Metcalf (2019), en las que impuestos al carbono bien diseñados pueden incluso aumentar el empleo. Adicionalmente a estos resultados, Metcalf y Stock (2020b) encuentran para la misma muestra de países que un impuesto al CO₂ de 40 dólares por tonelada, que cubra el 30 % de las emisiones, daría lugar a una reducción acumulada entre el 4 % y 6 % de las emisiones.

Por el contrario, utilizando una metodología en base a un VAR estructural con un procedimiento alternativo de identificación de las innovaciones de la imposición del carbono para un panel de 28 países de la UE para las dos últimas décadas, Känzig y Konradt (2023) encuentran que un aumento en los precios del carbono incrementa significativamente los precios de la energía, el IPC y el desempleo, y reduce las emisiones, la producción industrial y el PIB. Este resultado está en línea con el que encuentra Känzig (2021) utilizando datos mensuales y trimestrales para el conjunto de la UE.

A diferencia de Metcalf y Stock (2020a, 2020b), los resultados de Känzig y Konradt (2023) y Känzig (2021) apuntan a que la reducción de emisiones mediante impuestos al carbono tendría un coste significativo sobre la actividad económica. En el promedio de resultados de seis modelos macroeconómicos para el conjunto de la eurozona, Brand *et al.* (2023) encuentran unos efectos intermedios: un impuesto al carbono desde 85 euros en 2021 a 140 euros por tonelada de CO₂ en 2030 reduciría las emisiones en un 10 % en 2030, pero a costa de una disminución acumulada del PIB de casi un 1 %.

4. Conclusiones

En este artículo realizamos una panorámica de los modelos macroeconómicos medioambientales que abordan los costes económicos del cambio climático, y simulan los efectos de las políticas con las que reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, mediante impuestos medioambientales que reflejen el coste social del carbono y las inversiones en nuevas tecnologías que permiten reducir o capturar las emisiones de CO₂ y producir energía verde. Se analizan también los principales resultados de la investigación empírica que estima los efectos económicos del cambio climático y de la imposición medioambiental.

Aunque en las últimas décadas se han producido avances importantes en la modelización económica del cambio climático, hay todavía bastante incertidumbre sobre el coste económico del cambio climático. Las investigaciones más recientes indican que, en el escenario base, el impacto de un aumento gradual de las temperaturas hasta alcanzar los 4 °C al final del presente siglo tendría un coste entre el 4 % y 10 % en términos de renta per cápita a largo plazo, pudiendo más que duplicar estos efectos si se materializan los escenarios más catastrofistas en la cola de la distribución de posibles eventos.

Las proyecciones de los efectos económicos de distintos escenarios del cambio climático son muy sensibles a los supuestos de la función de daños del aumento de temperatura, de la acumulación de carbono en la atmósfera y de las emisiones, que están rodeados de una elevada

incertidumbre. Si a todo ello se añade la sensibilidad a las tasas sociales de descuento, las estimaciones del coste social del carbono están sujetas a amplios rangos de variación. Las estimaciones econométricas de los efectos del cambio climático o de la imposición al carbono son de mucha utilidad para acotar estas incertidumbres, pero también están sujetas a problemas importantes. Un claro ejemplo es la dificultad para diferenciar entre los efectos del aumento de las temperaturas sobre el nivel del PIB per cápita o de su tasa de crecimiento.

Estas limitaciones no pueden servir de excusa para retrasar la adopción de políticas que aceleren la transición energética hacia economías neutrales en carbono. Más bien al contrario, la adopción de impuestos al carbono y los incentivos a la innovación y adopción de energías sostenibles y procesos productivos eficientes es la mejor estrategia para asegurarnos frente a la incertidumbre de que se materialicen escenarios catastróficos e irreversibles a nuestra escala temporal.

Referencias bibliográficas

- Acemoglu, D., Aghion, P., Bursztyn, L., & Hemous, D. (2012). The environment and directed technical change. *American Economic Review*, 102(1), 131-166.
- Andersson, J. J. (2019). Carbon Taxes and CO₂ Emissions: Sweden as a Case Study. *American Economic Journal: Economic Policy*, 11(4), 1-30.
- Andrés, J. y Doménech, R. (2020). Cambio climático y crecimiento económico. *Revista de Geoeconomía*. <http://bit.ly/3l845OA>
- Andrés, J., Bosca, J. E., Doménech, R., & Ferri, J. (2023). Net-Zero Transition and Welfare in General Equilibrium. *BBVA Research*. Mimeo.
- Andrés, J., Barrutiabengoa, J. M., Cubero, J. J., & Doménech, R. (2023). *Social Welfare and the Social Cost of Carbon* (BBVA Research Working Paper No. 23/04). Banco Bilbao Vizcaya Argentaria. <http://t.ly/yH7h>
- Annicchiarico, B., Carattini, S., Fischer, C., & Heutel, G. (2021). *Business cycles and environmental policy: Literature review and policy implications* (NBER Working Paper No. 29032). National Bureau of Economic Research.
- Annicchiarico, B., & Di Dio, F. (2015). Environmental policy and macroeconomic dynamics in a new Keynesian model. *Journal of Environmental Economics and Management*, 69, 1-21. <http://t.ly/f-XQF>
- Auffhammer, M. (2018). Quantifying economic damages from climate change. *Journal of Economic Perspectives*, 32(4), 33-52. <https://rb.gy/qcmah>
- Barrutiabengoa, J. M., Cubero, J. J., & Más, P. (2022). Measuring the CO₂ Footprint of European Households: A comprehensive approach. *BBVA Research*. <http://bit.ly/3PZpwG6>
- Batten, S. (2018). *Climate change and the macro-economy: a critical review* (Bank of England Staff Working Paper No. 706). <http://t.ly/bD-hK>
- BCE. (2021). *Climate change and monetary policy in the euro area* (BCE Occasional Paper Series No. 271). Banco Central Europeo. <http://bit.ly/3NPikd0>
- Blanchard, O., Gollier, C., & Tirole, J. (2022). The portfolio of economic policies needed to fight climate change. *Annual Review of Economics*, 15, 689-722. <http://t.ly/j6e1u>
- Botzen, W., Deschenes, O., & Sanders, M. (2019). The Economic Impacts of Natural Disasters: A Review of Models and Empirical Studies. *Review of Environmental Economics and Policy*, 13(2), 167-188. Association of Environmental and Resource Economists. <https://rb.gy/a70zc>
- Brand, C., Coenen, G., Hutchinson, J., & Saint Guilhem, A. (2023, May 25). How will higher carbon prices affect growth and inflation? *The ECB Blog*. <http://t.ly/h8ZLp>
- Burke, M., Davis, W. M., & Diffenbaugh, N. S. (2018). Large potential reduction in economic damages under UN mitigation targets. *Nature*, 557, 549-553. <http://t.ly/ti2uE>
- Dell, M., Jones, B. F., & Olken, B. A. (2014). What Do We Learn from the Weather? The New Climate-Economy Literature. *Journal of Economic Literature*, 52(3), 740-798. <http://bit.ly/352jzOz>
- Dietz, S., & Stern, N. (2015). Endogenous growth, convexity of damage and climate risk: how Nordhaus' framework supports deep cuts in carbon emissions. *The Economic Journal*, 125(583), 574-620. <http://bit.ly/ws/F7DK>
- Golosov, M., Hassler, J., Krusell, P., & Tsyvinski, A. (2014). Optimal taxes on fossil fuel in general equilibrium. *Econometrica*, 82(1), 41-88. <http://bit.ly/2th7zLb>
- Graff Zivin, J., & Neidell, M. (2014). Temperature and the allocation of time: Implications for climate change. *Journal of Labor Economics*, 32(1), 1-26. <https://rb.gy/hyfb0>
- Hassler, J., Krusell, P., Olovsson, C., & Reiter, M. (2020). *On the effectiveness of climate policies* (IIES Working Paper). Institute for International Economic Studies. <https://bit.ly/3LtgIFN>
- Hassler, J. (2023). Lecture Notes on Climate Damages. *Institute for International Economic Studies (IIES)*. Mimeo. <http://bit.ly/3OzILGJ>
- Hausfather, Z. (2018, June 19). How scientists estimate 'climate sensitivity'. *CarbonBrief*. <http://t.ly/T7Wmg>

- Heutel, G. (2012). How should environmental policy respond to business cycles? Optimal policy under persistent productivity shocks. *Review of Economic Dynamics*, 15(2), 244-264.
- Howard, P. H., & Sterner, T. (2017). Few and not so far between: a meta-analysis of climate damage estimates. *Environmental and Resource Economics*, 68(1), 197-225.
- Huber, M., & Knutti, R. (2012). Anthropogenic and natural warming inferred from changes in Earth's energy balance. *Nature Geoscience*, 5(1), 31-36. <http://t.ly/t1UJ>
- IPCC. (2023): *Climate Change 2023. AR6 Synthesis Report*. Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>
- Jouzel, J., Masson-Delmotte, V., Cattani, O., Dreyfus, G., Falourd, S., Hoffmann, G., Minster, B., Nouet, J., Chappellaz, J., Fischer, H., Gallet, J. C., Johnsen, S., Leuenberger, M., Loulergue, L., Luethi, D., Oerter, H., Parrenin, F., Raisbeck, G., Raynaud, D.,... & Wolff, E. W. (2007). Orbital and millennial Antarctic climate variability over the past 800,000 years. *Science*, 317(5839), 793-796.
- Kahn, M. E., Mohaddes, K., Ng, R. N., Pesaran, M. H., Raissi, M., & Yang, J.-C. (2021). Long-term macroeconomic effects of climate change: A cross-country analysis. *Energy Economics*, 104, 105624. <https://rb.gy/wumpt>
- Kalkuhl, M., & Wenz, L. (2020). The impact of climate conditions on economic production. Evidence from a global panel of regions. *Journal of Environmental Economics and Management*, 103, 102360. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2020.102360>
- Känzig, D. R. (2021). The unequal economic consequences of carbon pricing. *Social Science Research Network (SSRN)*, 3786030. <http://bit.ly/42b3Klc>
- Känzig, D. R., & Konradt, M. (2023). *Climate Policy and the Economy: Evidence from Europe's Carbon Pricing Initiatives* (NBER Working Paper No. 31260). National Bureau of Economic Research. <http://t.ly/Rxpk>
- Kotz, M., Levermann, A., & Wenz, L. (2022). The effect of rainfall changes on economic production. *Nature*, 601(7892), 223-227. <http://t.ly/UWw>
- Kotz, M., Wenz, L., Stechemesser, A., Kalkuhl, M., & Levermann, A. (2021). Day-to-day temperature variability reduces economic growth. *Nature Climate Change*, 11(4), 319-325. <http://t.ly/Vfe5>
- Lamb, W. F., Wiedmann, T., Pongratz, J., Andrew, R., Crippa, M., Olivier, J. G. J., Wiedenhofer, D., Mattioli, G., Khourdajie, A. A., House, J., Pachauri, S., Figueroa, M., Saheb, Y., Slade, R., Hubacek, K., Sun, L., Ribeiro, S. K., Khennas, S., de la Rue du Can, S.,... & Minx, J. (2021). A review of trends and drivers of greenhouse gas emissions by sector from 1990 to 2018. *Environmental Research Letters*, 16(7), 073005. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abee4e>
- Letta, M., & Tol, R. S. J. (2019). Weather, climate and total factor productivity. *Environmental and Resource Economics*, 73(1), 283-305. <https://rb.gy/jrchs>
- Lüthi, D., Le Floch, M., Bereiter, B., Blunier, T., Barnola, J.-M., Siegenthaler, U., Raynaud, D., Jouzel, J., Fischer, H., Kawamura, K., & Stocker, T. F. (2008). High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000-800,000 years before present. *Nature*, 453(7193), 379-382.
- Metcalfe, G. E. (2019). On the Economics of a Carbon Tax for the United States. In *Brookings Papers on Economic Activity: Spring 2019* (pp. 405-458). Brookings Institution.
- Metcalfe, G. E., & Stock, J. H. (2020a). Measuring the macroeconomic impact of carbon taxes. *AEA Papers and Proceedings*, 110, 101-106. http://t.ly/WI_f
- Metcalfe, G. E., & Stock, J. H. (2020b). *The macroeconomic impact of Europe's carbon taxes* (NBER Working Paper No. 27488). National Bureau of Economic Research. <http://t.ly/XZIO>
- Mokyr, J. (2018). The past and the future of innovation: Some lessons from economic history. *Explorations in Economic History*, 69, 13-26.
- Newell, R. G., Prest, B. C., & Sexton, S. E. (2021). The GDP-temperature relationship: implications for climate change damages. *Journal of Environmental Economics and Management*, 108, 102445.
- NGFS. (2022). *NGFS Scenarios for Central Banks and Supervisors*. Network of Central Banks and Supervisors for Greening the Financial System. <http://bit.ly/3pCxydA>
- NOAA. (2022). *Trends in Atmospheric Carbon Dioxide*. National Oceanic & Atmospheric Administration, U. S. Department of Commerce. <http://t.ly/R32->
- Nordhaus, W. D. (1977). Economic growth and climate: the carbon dioxide problem. *The American Economic Review*, 67(1), 341-346.
- Nordhaus, W. D. (1992). An optimal transition path for controlling greenhouse gases. *Science*, 258(5086), 1315-1319.
- Nordhaus, W. D. (1993). Rolling the «dice»: an optimal transition path for controlling greenhouse gases. *Resource and Energy Economics*, 15(1), 27-50.
- Nordhaus, W. D. (2007). *The Challenge of Global Warming: Economic Models and Environmental Policy*. Yale University. <https://bit.ly/3EnYZeE>
- Nordhaus, W. D. (2013). *The climate casino: risk, uncertainty, and economics for a warming world*. Yale University Press.
- Nordhaus, W. D. (2018). Evolution of modeling of the economics of global warming: changes in the DICE model, 1992-2017. *Climatic Change*, 148(4), 623-640. <http://bit.ly/2PPq4PG>
- Nordhaus, W. D., & Moffat, A. (2017). *A survey of global impacts of climate change: replication, survey methods, and a statistical analysis* (NBER Working Paper No. 23646). National Bureau of Economic Research.

- O'Hara Jr., F. (1990). *Glossary: Carbon Dioxide and Climate*. Carbon Dioxide Information Analysis Center. Third Edition.
- Pindyck, R. S. (2013). Climate Change Policy: What Do the Models Tell Us? *Journal of Economic Literature*, 51(3), 860-872. <http://bit.ly/2P2ED1H>
- Pindyck, R. S. (2017). The Use and Misuse of Models for Climate Policy. *Review of Environmental Economics and Policy*, 11(1), 100-114. <https://t.ly/NkMh>
- Rezai, A., & van der Ploeg, F. (2016). Intergenerational Inequality Aversion, Growth, and the Role of Damages: Occam's Rule for the Global Carbon Tax. *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, 3(2), 493-522. <https://rb.gy/0wbfb>
- Riahi, K., van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Cuaresma, J. C., KC, S., Leimbach, M., Jiang, L., Kram, T., Rao, S., Emmerling, J.,... & Tavoni, M. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change*, 42, 153-168. <http://t.ly/hJXR>
- Stern, N. (2013). The structure of economic modeling of the potential impacts of climate change: grafting gross underestimation of risk onto already narrow science models. *Journal of Economic Literature*, 51(3), 838-859.
- Stern, N. (2018). Public economics as if time matters: Climate change and the dynamics of policy. *Journal of Public Economics*, 162, 4-17. <https://rb.gy/woil7>
- Stern, N. (2022). Towards a carbon neutral economy: How government should respond to market failures and market absence. *Journal of Government and Economics*, 6(1-2), 100036. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jge.2022.100036>
- Stiglitz, J. (2019, December 9). Is Growth Passé? *Project Syndicate*. <http://bit.ly/2PF4aNM>
- Tol, R. S. (2009). The economic effects of climate change. *Journal of Economic Perspectives*, 23(2), 29-51. <https://doi.org/10.1257/jep.23.2.29>
- Tol, R. S. (2018). The economic impacts of climate change. *Review of Environmental Economics and Policy*, 12(1), 4-25. <https://www.journals.uchicago.edu/doi/epdf/10.1093/reep/rex027>
- Tol, R. S. (2019). A social cost of carbon for (almost) every country. *Energy Economics*, 83, 555-566. <http://bit.ly/2QjoA0n>
- Tol, R. S. (2022). A meta-analysis of the total economic impact of climate change. *arXiv preprint arXiv:2207.12199*.
- Tol, R. S. (2023). Social cost of carbon estimates have increased over time. *Nature Climate Change*, 13(6), 1-5. <http://t.ly/Wl5oW>
- Tsigaris, P., & Wood, J. (2016). A simple climate-Solow model for introducing the economics of climate change to undergraduate students. *International Review of Economics Education*, 23, 65-81. <http://t.ly/msDS>
- Tsigaris, P., & Wood, J. (2019). The potential impacts of climate change on capital in the 21st century. *Ecological Economics*, 162, 74-86. <https://rb.gy/vjtqr>
- Weitzman, M. L. (2012). GHG targets as insurance against catastrophic climate damages. *Journal of Public Economic Theory*, 14(2), 221-244. <https://t.ly/Qm9W>