

CAMBIO CLIMÁTICO, CRECIMIENTO ECONÓMICO Y EL PAPEL DE LAS TECNOLOGÍAS ENERGÉTICAS

Antonia DÍAZ

Universidad Carlos III de Madrid

Gustavo A. MARRERO

Universidad de La Laguna

Luis A. PUCH (*)

Universidad Complutense de Madrid

Resumen

En este trabajo estudiamos la importancia de la tecnología energética y del *mix* energético para determinar la elasticidad de las emisiones de CO₂ respecto al nivel de actividad económica. Para este estudio, estimamos un modelo empírico basado en modelos DICE con datos de panel donde se diferencia entre *mix* de origen fósil y renovables. La eficiencia energética y la cartera de renovables de última generación son los elementos claves para reducir las emisiones de CO₂.

Palabras clave: emisiones, intensidad energética, PIB, *mix* energético, energía renovable, modelos de panel.

Abstract

In this paper we study the importance of the energy technology and the energy mix in determining the elasticity of CO₂ emissions with respect to the level of economic activity. To this end, we estimate an empirical model based on DICE models with panel data where we distinguish between fossil and renewable in the primary energy mix. Energy efficiency and the importance of high-tech renewable energy portfolio are the key elements to reduce CO₂ emissions.

Keywords: emissions, energy intensity, GDP, energy mix, renewable energy, panel models.

JEL classification: C23, O5, Q2, Q43.

I. CRECIMIENTO Y CAMBIO CLIMÁTICO: UNA RELACIÓN MACROECONÓMICA

ES para todos evidente que el cambio climático es un problema sobre el que urge tomar medidas para enfrentar sus peores consecuencias. Para ello, debemos entender y medir la relación entre cambio climático y actividad económica. Esta relación es dinámica y de doble dirección: el clima afecta nuestra productividad, el rendimiento de nuestras inversiones y, simultáneamente, nuestras decisiones dejan una huella medio ambiental.

Nordhaus, en diversos trabajos desde 1977, fue el primero que estudió la relación entre crecimiento económico y cambio climático, y ha diseñado los modelos canónicos para estudiar esta relación. Para ello, amplió el modelo neoclásico de crecimiento, el modelo de Solow, en tres direcciones (el modelo DICE): primero, con una descripción estadística de la evolución del clima en función de los niveles de concentración de CO₂ en la atmósfera; segundo, un modelo dinámico que cuantifica las emisiones de CO₂ derivadas de la actividad económica y, tercero, una ecuación que explicita el efecto del clima sobre la actividad económica. En este artículo nos

centramos en el segundo ingrediente: vamos a estudiar la evidencia disponible sobre las emisiones de CO₂ imputables a la actividad económica y su evolución en el tiempo desde un punto de vista macroeconómico. Creemos que la visión macroeconómica es necesaria porque el impacto ambiental es la externalidad por antonomasia y, por tanto, la mirada global es necesaria para poder adoptar medidas efectivas contra el cambio climático. Esta evidencia es necesaria para orientar, como vamos a explicar, la elaboración de los modelos que usamos como herramientas de política económica.

Para realizar nuestro estudio nos basamos en Marrero (2010) y Díaz, Marrero y Puch (2016). Usamos un panel de datos de la Agencia Internacional de la Energía (IEA, por sus siglas en inglés) con más de 150 países. La información recoge sus emisiones anuales, el nivel del PIB per cápita en paridad del poder adquisitivo e información variada sobre su actividad económica. En particular, conocemos su *mix* energético primario (las diversas fuentes energéticas usadas para producir tanto energía como bienes intermedios y finales), así como la composición sectorial del PIB. Pasamos a revisar, someramente, los resultados que obtenemos.

En la sección segunda presentamos una evidencia básica de series temporales y sección cruzada a partir de los datos que ofrece la IEA. Lo primero que destaca es que el nivel de emisiones aumenta con el nivel del PIB per cápita, tanto en series temporales como en datos de sección cruzada, aun cuando la heterogeneidad es muy grande. El sector energético es responsable, de forma directa e indirecta, del 75 por 100 de las emisiones. Por eso la reducción de emisiones pasa por una transición de energías de origen fósil a renovables. Esta evidencia ha llevado a incorporar el *mix* energético y la transición tecnológica desde energías fósiles a renovables en las nuevas olas de modelos DICE. Como ejemplo de la literatura macroeconómica, véase Hassler *et al.* (2019), o Díaz, Marrero y Puch (2020).

La evidencia preliminar que presentamos en la sección segunda muestra que la relación entre emisiones de CO₂ y crecimiento económico depende de la intensidad energética, entendida como la ratio uso energético final-PIB, del *mix* energético del país (del grado de carbonización) y del ciclo económico (la actividad económica *per se*). Es por esto que acudimos a datos de panel y técnicas econométricas para estudiar a fondo esta relación. En la sección tercera explicamos el fundamento teórico del modelo empírico de emisiones y crecimiento económico que presentamos en la siguiente sección. En esta sección también mostramos una versión compacta de una generalización de tres de las principales ecuaciones de un modelo DICE: primero, una función de producción que depende del *mix* energético primario y del estado de la tecnología; segundo, una función del daño climático en la productividad agregada; y, tercero –y la más importante para este artículo–, una función que expresa la evolución de las emisiones de CO₂ como función del nivel del PIB y la tecnología energética que determina tanto la intensidad como el *mix* energético. Queremos destacar que, como en Díaz, Marrero y Puch (2020), explicitamos con detalle el *mix* energético de origen fósil y el renovable. En la sección cuatro, presentamos el modelo empírico que vamos a estimar y nuestra metodología econométrica. Para obtener correlaciones, estimamos por *pool-OLS* incluyendo efectos fijos temporales y regionales. Sin embargo, debido a los potenciales problemas de doble causalidad entre emisiones, actividad económica y consumo energético, usamos el procedimiento de *System GMM* (Arellano y Bover, 1995; Blundell y Bond, 1998), reduciendo su número de instrumentos para no incurrir en problemas de sobreidentifi-

cación por el excesivo número de instrumentos (Roodman, 2009).

Los resultados que se explican en los puntos 1 y 2 de la sección quinta evidencian que la intensidad energética es importante: los países que tienen una ratio de uso energético-PIB más alta son los que más contaminan por unidad de producción. La intensidad energética, como explicamos en el punto 1 de esta sección, explica por qué puede haber un aparente resultado de convergencia: las emisiones crecen menos en aquellos países con un mayor volumen de emisiones en el pasado. Controlando por intensidad energética el resultado de convergencia desaparece. La importancia de la intensidad energética que obtenemos está en consonancia con la evidencia recabada por la IEA que estima que las mejoras en eficiencia energética (la inversa de la intensidad) pueden contribuir en un 35 por 100 al objetivo de reducción de emisiones marcado en el Acuerdo de París para 2050 (1). La importancia de la eficiencia energética ha llevado a diversos autores a centrarse en el estudio macroeconómico de sus determinantes y los efectos de los cambios en los precios energéticos. El trabajo pionero de Atkeson y Kehoe (1992) puso el acento en la complementariedad entre energía y capital: la eficiencia energética está incorporada al capital, por lo que un aumento en la eficiencia energética pasa por cambios en la inversión agregada. Esta idea la desarrollan posteriormente Díaz y Puch (2004, 2019b) para estudiar cómo el progreso tecnológico y cambios en el precio del petróleo afectan a la eficiencia energética. En particular Díaz y Puch (2019b) muestran que el abaratamiento del capital propiciado por los cambios tecnológicos puede tener un «efecto rebote» en la intensidad energética (2). Estos autores también muestran que el patrón cíclico de las ganancias en eficiencia energética está vinculado al de la inversión. Estas investigaciones nos dicen que la relación entre PIB e intensidad energética no es monótona y, por tanto, el efecto de la intensidad energética sobre el nivel de emisiones depende de la tecnología y de los cambios cíclicos del PIB (recordemos que la inversión es procíclica). Esto es exactamente a lo que apuntan los resultados que obtenemos en los puntos 1 y 2.

Nuestras estimaciones también revelan que la composición sectorial del PIB, aun cuando afecta al nivel de emisiones, tiene una importancia menor en comparación al de la intensidad energética, salvo la del sector del transporte, con una contribución similar al sector energético. Algunos ejemplos de

la literatura que estudia las emisiones y el consumo energético en el sector del transporte son Guerrero-Lemus, Marrero y Puch (2012), González *et al.* (2019) o Marrero, Rodríguez-López y González-Marrero (2019). Por último, conviene destacar que nuestros resultados apuntan a que hay una relación no monótona entre intensidad energética, PIB y emisiones, lo que se debería a la evolución del *mix* energético primario al crecer el nivel de renta: los países más pobres hacen un uso más intensivo de energías renovables tradicionales, los países de renta media usan intensivamente energía de origen fósil y son los países ricos los que invierten en energías verdes de última generación: solar y fotovoltaica. Esta evidencia está en consonancia con los recientes resultados de Díaz *et al.* (2019), donde se estudia directamente la relación entre crecimiento económico, intensidad energética y diferentes tipos de energías renovables. En Díaz, Marrero y Puch (2020) modelamos esta transición energética para entender los efectos que los impuestos y subvenciones medio ambientales puedan tener en su dinámica.

Cuantitativamente, nuestros resultados revelan la relevancia que tiene el cambio del modelo energético para reducir las emisiones de CO₂ sin tener que contraer la economía. Así, nuestras estimaciones apuntan a que la elasticidad a corto plazo entre las emisiones per cápita y los niveles de actividad es superior a la unidad: crecer implica emitir CO₂ más que proporcionalmente. Sin embargo, encontramos que reducir la intensidad energética en un 1 por 100 conllevaría una reducción algo inferior (pero próxima al 1 por 100) en las emisiones de CO₂ por habitante. Con relación a los cambios en el *mix* energético, los resultados apuntan a que lo más relevante es el cambio en el *mix* de consumo primario. Así, la mayor reducción de emisiones proviene de sustituir petróleo por renovables, seguido por nuclear y gas natural, mientras que aumentaría si la sustitución se hace hacia carbón. Nuestras estimaciones apuntan a que un aumento en un punto porcentual en el *mix* de renovables (a cambio de petróleo) estaría asociado, *ceteris paribus*, con una caída en las emisiones por habitante del entorno de un 1,85 por 100 anual. La combinación de la reducción de la intensidad energética unida a un aumento en el *mix* de renovables claramente podría compensar el aumento de las emisiones proveniente del crecimiento económico, reconciliando de esta manera el crecimiento con la sostenibilidad medioambiental.

El resto del artículo se estructura de la siguiente manera. La sección segunda presenta los datos de emisiones, energía y actividad económica, y muestra alguna evidencia preliminar. La sección tercera presenta un modelo de corte neoclásico que muestra la relación entre las emisiones de CO₂, la actividad económica y el uso de energía. La sección cuarta presenta el modelo empírico a estimar (un modelo dinámico de panel). La sección quinta presenta los resultados de las estimaciones. Finalmente, la sección sexta concluye.

II. EVIDENCIA BÁSICA

Para reflexionar sobre la relación entre crecimiento económico y emisiones de CO₂ recordemos la *identidad de Kaya*, según la cual podemos descomponer las emisiones de CO₂ de la forma siguiente:

$$CO_{2t} = POB_t \times \frac{PIB_t}{POB_t} \times \frac{ENER_t}{PIB_t} \times \frac{CO_{2t}}{ENER_t}. \quad [1]$$

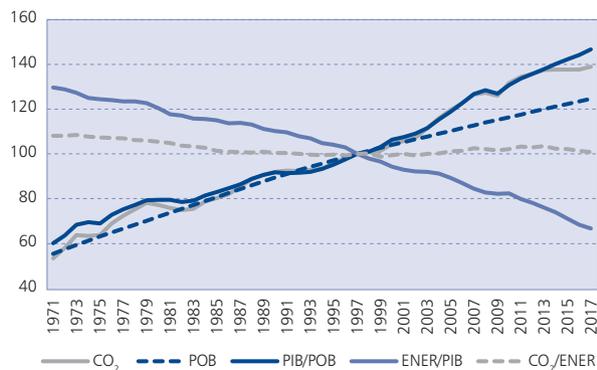
Esta ecuación muestra que la actividad económica afecta a las emisiones de CO₂ a través de varios canales. Los dos primeros podríamos llamarlos factores extensivos y se deben al mero crecimiento poblacional y al hecho de que el PIB per cápita varía en el tiempo. Los otros dos canales son tecnológicos. ENER mide el uso energético primario (de todas las fuentes) en millones de toneladas equivalentes a petróleo. Al estadístico ENER/PIB se le conoce como *intensidad energética* y es un indicador de la tecnología energética: cuanto más eficiente es esta, menor es el uso de energía por unidad de valor añadido. Al estadístico CO₂/ENER se le conoce como *intensidad de carbonización (carbon footprint)* y es un indicador del grado de limpieza del *mix* energético. Por ejemplo, un aumento de energía de origen eólico y una caída del petróleo haría caer el índice CO₂/ENER. Para medir la importancia práctica de cada uno de los componentes de la identidad de Kaya hemos recogido datos de la IEA sobre emisiones de CO₂ (2). Para el período 1971-2017 tenemos emisiones de CO₂ para 147 países, su población (POB), el nivel del PIB en paridad de poder adquisitivo (PIB) y el uso energético primario (de todas las fuentes) en millones del equivalente a petróleo (ENER).

El gráfico 1 muestra, para el total de los 147 países, la evolución de las emisiones de CO₂ y de todos los componentes de la identidad de Kaya

mostrada en la ecuación [1]. Cada una de estas series se presenta normalizada a su dato de 1997, el año de la firma del Protocolo de Kyoto. El cuadro n.º 1, por su parte, muestra las tasas de crecimiento media de cada una de las variables consideradas. A nivel mundial, las series de CO_2 y PIB per cápita que aparecen en el gráfico 1 se mueven a la par. Sus tasas de crecimiento medias para el período 1971-2017, como indica el cuadro n.º 1, son casi iguales: 1,84 y 1,87, respectivamente. Esto nos dice que el efecto del aumento poblacional está totalmente compensado por la acusada caída en la intensidad energética (ENER/PIB, línea verde) y la moderada ganancia en descarbonización, CO_2/ENER , que se debe al aporte de las energías renovables al uso primario. Cabe destacar que durante el período 1997-2017, a pesar de los acuerdos del Protocolo de Kyoto, no hay ganancias en descarbonización, aunque hay una mejora desde 2013 que explica que las emisiones de CO_2 aumenten más lentamente que el PIB per cápita desde entonces.

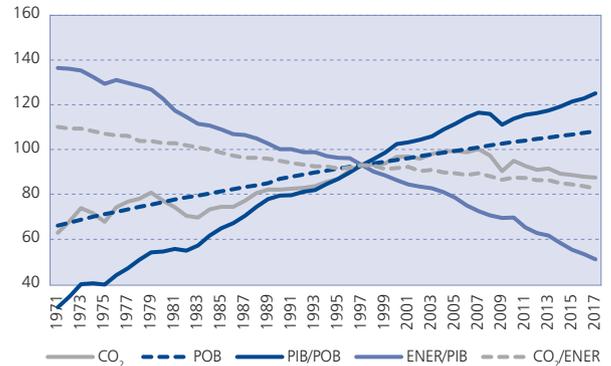
Esta pauta general esconde mucha heterogeneidad. El gráfico 2 muestra la evolución del conjunto de los países de la OCDE. Vemos que en este caso las emisiones crecen a una tasa apreciablemente menor (de hecho, caen desde 2007): 0,46 por 100 frente a una tasa de crecimiento media del PIB per cápita de 1,78 por 100. El cuadro n.º 1 muestra las diferencias fundamentales de los países de la OCDE con el resto del mundo, especialmente desde la firma del Protocolo de Kyoto: un aumento más moderado de la población, una caída mayor en la intensidad energética y, sobre todo, una caída mucho más acusada del estadístico CO_2/ENER , indicando que la

GRÁFICO 1
EMISIONES Y CRECIMIENTO DEL PIB EN EL MUNDO



Fuente: Elaboración propia.

GRÁFICO 2
EMISIONES Y CRECIMIENTO DEL PIB EN LA OCDE



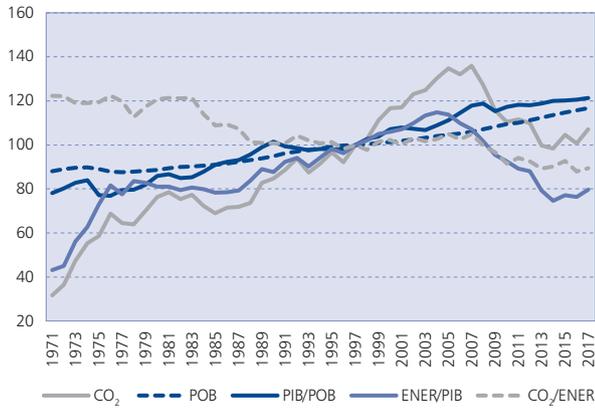
Fuente: Elaboración propia.

descarbonización avanza a mayor ritmo en la OCDE gracias a un mayor impulso de la transición energética de fuentes fósiles a renovables.

Para acabar, presentamos la evolución de las emisiones para España. El gráfico 3 muestra que España tiene un comportamiento muy dispar dentro de la OCDE. Para el período entero 1971-2017, el nivel de emisiones creció al 1,62 por 100, casi el doble que la tasa de crecimiento del PIB per cápita. Durante el período 1997-2017 esta tendencia se revierte, creciendo las emisiones a un tercio de la tasa del PIB per cápita (0,34 frente a 1,02 por 100). Pero lo más llamativo es la evolución de la intensidad energética, ENER/PIB, y la carbonización, CO_2/ENER . Al contrario que en el conjunto de la OCDE, la intensidad energética en España ha estado aumentando hasta 2005 pero, sorprendentemente, la tasa de descarbonización, la caída en CO_2/ENER , es mayor en España. Es decir, usamos mucha energía por unidad de valor añadido, pero la descarbonización ha avanzado a buen ritmo. Sospechamos que estos patrones vienen determinados por la evolución sectorial en España. Además, el gráfico 3 sugiere que la evolución reciente viene determinada por el *boom* inmobiliario y el posterior parón, el comportamiento de la construcción y del transporte por carretera asociados a dicho *boom*. Gutiérrez, Marrero y Puch (2011) discuten en detalle estos patrones.

Ahora podemos preguntarnos, ¿este patrón temporal de emisiones de CO_2 y crecimiento del PIB se observa también en sección cruzada? El gráfico 4 muestra el PIB per cápita y las emisiones de CO_2 per cápita para 120 países en el mundo en 2017. El

GRÁFICO 3
EMISIONES Y CRECIMIENTO DEL PIB EN ESPAÑA



Fuente: Elaboración propia.

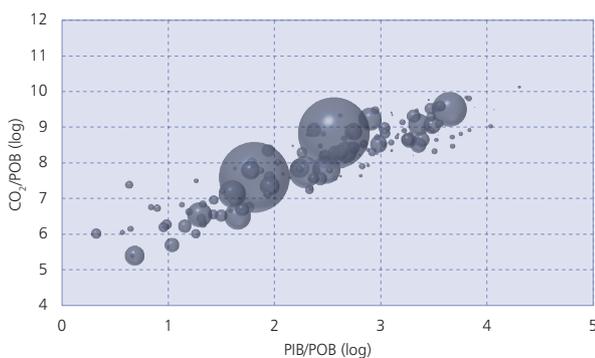
CUADRO N.º 1

TASAS DE CRECIMIENTO MEDIAS ANUALES

	Mundo		OCDE		España	
	1971-2017	1997-2017	1971-2017	1997-2017	1971-2017	1997-2017
CO ₂	1,84	1,87	0,46	-0,23	1,62	0,34
POP	1,48	1,18	0,78	0,62	0,61	0,80
GDP/POP	1,86	2,25	1,78	1,33	0,92	1,02
TPES/GDP	-1,33	-1,57	-1,57	-1,73	0,78	-0,96
CO ₂ /TPES	-0,15	0,04	-0,51	-0,44	-0,70	-0,50

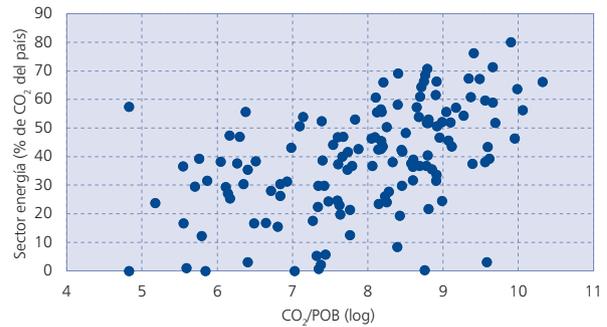
Fuente: Elaboración propia.

GRÁFICO 4
PIB PER CÁPITA Y EMISIONES EN 2017



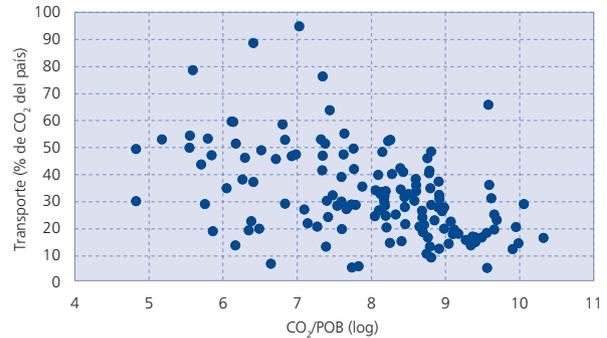
Fuente: Elaboración propia.

GRÁFICO 5
PIB PER CÁPITA Y PORCENTAJE DE EMISIONES GENERADAS POR LOS SECTORES ENERGÉTICOS EN 2017



Fuente: Elaboración propia.

GRÁFICO 6
PIB PER CÁPITA Y PORCENTAJE DE EMISIONES GENERADAS POR EL SECTOR DEL TRANSPORTE EN 2017



Fuente: Elaboración propia.

tamaño de la burbuja está determinado por el porcentaje de la población mundial del país. Por tanto, la asociación entre emisiones y PIB se da en series temporales y datos de sección cruzada, pero la dispersión es sustancial. El gráfico 4 nos sugiere, además, que la coordinación internacional de políticas ambientales requiere, en la práctica, el acuerdo de muy pocos países, pero que suponen un porcentaje sustancial de la población mundial.

Por último, a la hora de pensar en los factores que determinan la asociación entre emisiones y crecimiento debemos preguntarnos ¿qué actividades son las que más contaminan? El gráfico 5

ordena los países por sus niveles de emisiones per cápita y muestra el porcentaje de las emisiones originadas en el sector energético en 2017. En un gran porcentaje de países la ratio está por encima del 30 por 100. La dispersión observada depende fundamentalmente de las características del *mix* energético primario. La IEA estima que, en 2018, el sector energético fue responsable de dos terceras partes de las emisiones de efecto invernadero. En el total mundial, el 43,26 por 100 de las emisiones se deben al sector energético. De hecho, la IEA estima que el sector energético es responsable, de manera directa o indirecta, de dos terceras partes de las emisiones totales. Si comparamos el gráfico 5 con el gráfico 4 vemos que no solo el nivel de emisiones aumenta con el nivel del PIB per cápita, sino que, en media, un mayor porcentaje de esas emisiones vienen del sector energético. El resto de las emisiones proceden de los sectores finales. El gráfico 6 muestra el porcentaje de emisiones generadas por el sector de transporte. Estos dos gráficos juntos muestran que el grueso de las emisiones (el 70,72 por 100 del global) proceden de estos dos sectores.

La conclusión a la que llegamos es que el nivel de emisiones depende crucialmente del *mix* energético primario (que determina las emisiones del sector de la energía), así como de la composición sectorial, siendo el transporte el sector clave para reducir las emisiones de los sectores finales de la economía.

III. CRECIMIENTO ECONÓMICO, TECNOLOGÍA ENERGÉTICA Y EMISIONES: LA CONEXIÓN TEÓRICA

A partir de la evidencia descriptiva anterior, nuestra estrategia consiste en establecer una relación entre las emisiones de CO₂ y dos variables fundamentales: la actividad económica y el uso de energía. El marco para el análisis es el de la teoría neoclásica del crecimiento, que es el entorno más básico que podemos considerar para establecer un vínculo entre el uso de la energía y la macroeconomía. Concretamente, ampliamos una especificación particular de la teoría de la producción neoclásica con uso de energía, incorporando un supuesto acerca de cómo se generan las emisiones contaminantes. Esta modelación amplía la expresión de los modelos DICE explicitando el papel de la energía. Véase, por ejemplo, Brock y Taylor (2004), o Álvarez, Marrero y Puch (2005).

El punto de partida es considerar una función de producción agregada bajo rendimientos constantes a escala. La especificación más sencilla que podemos considerar supone que la producción agregada se obtiene de una combinación de capital, trabajo y energía, y en presencia de progreso técnico. Por sencillez, y siguiendo Díaz *et al.* (2019), suponemos que el *input* energético, Z_t , combina energía de origen fósil y renovable de manera imperfecta, y que B_t sintetiza el resto de recursos, como capital y trabajo, y el estado de la tecnología. Bajo estos supuestos, la tecnología productiva puede escribirse como:

$$Y_t = B_t (\vartheta Z_{ft}^{\nu} + (1 - \vartheta) Z_{gt}^{\nu})^{\theta/\nu}, \quad [2]$$

donde $0 < \theta < 1$, $0 < \vartheta < 1$ y $\nu \geq 0$. El *input* energético Z_t es una combinación de dos tipos de *inputs*, Z_{jt} , cada uno de ellos representando un agregado de uso primario de energía, bien de origen fósil, $j = f$, o bien de origen renovable, $j = g$. Vamos a suponer que la elasticidad de sustitución entre ambos agregados energéticos puede ser mayor que uno, de manera que ambos *inputs* sean sustitutos, y la economía podría operar usando solo un tipo de energía, fósil o renovable. Más concretamente, cada cesta de energías de tipo j es, a su vez, un *mix* de varias fuentes:

$$Z_{jt} = [\lambda_{j1} e_{j1t}^{\rho_j} + \lambda_{j2} e_{j2t}^{\rho_j} + \dots + \lambda_{jn} e_{jnt}^{\rho_j}]^{1/\rho_j}, \quad [3]$$

donde la elasticidad de sustitución de las diferentes fuentes energéticas dentro de cada uno de los agregados, Z_{jt} , $j = f, g$, pueda ser diferente de uno. Hemos optado por esta representación porque la composición sectorial de la economía y su velocidad de transformación afectan la elasticidad de la producción con respecto de cada fuente. Correspondientemente, y de manera muy estilizada, suponemos que,

$$B_t = \exp\{b_0\} \cdot Y_{t-1}^{\delta} \cdot (\varsigma EI_{ft}^{\nu} + (1 - \varsigma) EI_{gt}^{\nu})^{-\pi/\nu} \cdot \bar{B}_t, \quad [4]$$

donde $\delta > 0$, $\pi > 0$, y $b_0 > 0$. La ecuación [3] refleja el estado de la tecnología, a la vez que incorpora el resto de los *inputs* de producción distintos de energía. Si denotamos como E_{jt} la cantidad de energía consumida de tipo $j = f, g$, entonces:

$$EI_{jt} = \frac{E_{jt}}{Y_t}, \quad j = f, g, \quad [5]$$

de manera que el *mix* energético $j = f, g$, se puede escribir como $M_{jt} = Z_{jt}/E_{jt}$. De ahí llegamos a la siguiente expresión para Y_t :

$$Y_t = \exp\left\{\frac{b_0}{1-\theta}\right\} \cdot Y_{t-1}^{\frac{\delta}{1-\theta}} \cdot (\zeta EI_{ft}^v + (1-\zeta)EI_{gt}^v)^{\theta-\pi/v(1-\theta)} \cdot (\vartheta M_{ft}^v + (1-\vartheta)M_{gt}^v)^{\theta/v} \cdot \bar{B}_t^{\frac{1}{1-\theta}}. \quad [6]$$

El agregado \bar{B}_t , como hemos dicho, es un compendio de los efectos de los factores primarios de producción (capital y trabajo) así como de otros factores específicos para cada país y distintos momentos del tiempo. Esta expresión es una generalización de la propuesta por Díaz *et al.* (2019). Finalmente, suponemos que el daño climático, D_t , afecta negativamente a la productividad total de los factores:

$$\bar{B}_t = D_t^{-\psi} \bar{B}_t. \quad [7]$$

Siguiendo a Golosov *et al.* (2014), el daño climático se puede representar como una función del volumen de CO_2 acumulado en la atmósfera, que llamamos S_t :

$$D_t = \exp(-\gamma_t(S_t - \bar{S})). \quad [8]$$

La variable climática es, a su vez, un *stock* cuya evolución depende de la capacidad física de la naturaleza de absorber CO_2 —a la tasa ϖ —, y del flujo de emisiones en cada período, P_t . Para simplificar, podemos expresar la ley de evolución del clima como:

$$S_t = P_t + (1 - \varpi)S_{t-1}. \quad [9]$$

Nos queda la parte más importante que es la relación entre emisiones, P_t , y actividad económica. Vamos a suponer:

$$P_t = \exp(p_0)(\sigma \tilde{Z}_{ft}^\eta + (1-\sigma)Y_t^\eta)^{\varphi/\eta}, \quad [10]$$

de manera que solo la energía de origen fósil contribuye a las emisiones con elasticidad ρ respecto a la contribución de la actividad económica, Y_t . Esta representación permite que la pura actividad económica, aun cuando la economía no usara energía de origen fósil, pueda aumentar las emisiones. La notación \tilde{Z} indica que la forma en la que se combinan las distintas tecnologías fósiles para contribuir a la polución sigue la representación de la ecuación [2] anterior, pero con parámetros $\tilde{\gamma}_j$ y $\tilde{\rho}_j$ distintos a los parámetros γ_j y ρ_j que determinan la combinación de energías fósiles en el *input* productivo, puesto que hay energías más contaminantes que otras. Finalmente, una sencilla transformación algebraica nos permite escribir:

$$P_t = Z_{ft} \cdot Y_t \cdot \exp(p_0) \cdot \left(\frac{\sigma \tilde{Z}_{ft}^\eta + (1-\sigma)Y_t^\eta}{Z_{ft}^\eta \cdot Y_t^\eta}\right)^{\varphi/\eta} \quad [11]$$

para hacer explícitos los niveles agregados de uso de energía, Z_{ft} , e Y_t de la economía. El modelo empírico que implementamos en la siguiente sección se corresponde con la representación en primeras diferencias de la expresión [11]. Para ver una discusión detallada acerca de las restricciones de parámetros implicadas por el modelo empírico que presentamos a continuación véase Díaz *et al.* (2019).

IV. EL MODELO EMPÍRICO

A partir de los supuestos descritos en la sección tercera, introducimos la especificación de un modelo empírico que relaciona las emisiones de CO_2 con la actividad económica y las variables energéticas; en particular, la intensidad energética y el *mix* de consumo primario y final. Las variables macroeconómicas son el nivel de actividad y la tasa de crecimiento del PIB real por habitante, ajustadas por la paridad de poder adquisitivo (PPA) y se acompañan de un conjunto de efectos fijos y temporales que se han utilizado en la literatura. De este modo, consideramos el siguiente modelo dinámico de datos de panel:

$$GP_{i,t} = \alpha + R_i + T_t - \beta \ln(P_{i,t-s}) + \delta \ln(Y_{i,t-s}) + \varphi GY_{i,t} + \theta' X_{i,t} + \varepsilon_{i,t},$$

donde el crecimiento de las emisiones per cápita, GP , se regresa sobre un retardo del nivel de emisiones, P , y del nivel del PIB, Y , ambos en logaritmos, y sobre la tasa de crecimiento del PIB, GY . La regresión incluye un término constante, y variables *dummy* regionales y temporales. El elemento clave es el conjunto de controles, X , que describe las variables energéticas que afectan al crecimiento de las emisiones de CO_2 . Estas variables son específicas a cada país y a cada período y vienen representadas por:

$$\theta' X_{i,t} \equiv \theta_0 GEI_{i,t} + \sum_{j=1}^{J-1} \theta_j^m \Delta m_{j,i,t} + \sum_{k=1}^{K-1} \theta_k^s \Delta s_{k,i,t},$$

donde, en primer lugar, GEI mide la intensidad energética a través de los cambios en el uso de energía en unidades físicas sobre el PIB (consumo

de energía por dólar en términos constantes). A partir de aquí, cada Δm_j refleja el cambio en la participación en el *mix* de consumo energético primario (carbón, gas, nuclear y renovables), teniendo que omitir la categoría de consumo de petróleo para evitar problemas de multicolinealidad estricta en las estimaciones. Por su parte, Δs_k representa el cambio en la participación de cada sector de consumo energético final (residencial, industria, transporte, comercio y servicios), siendo el sector primario el omitido en este caso. En cada caso, por tanto, los coeficientes estimados se referirán en relación con las correspondientes categorías omitidas.

A continuación, mostramos, en primer lugar, los resultados de una especificación estilizada en la que ignoramos el papel del *mix* energético primario y del *mix* energético final (en el cuadro n.º 2 del punto 1 de la sección quinta). En esta especificación analizamos los resultados que se obtienen para distintas regiones según el nivel de renta de los países. Las estimaciones de esta tabla se realizan por *pool-OLS*, con el objetivo de facilitar su comparación con la descriptiva presentada en las secciones anteriores. Después, además de considerar los cambios en la intensidad energética, evaluamos el detalle del papel de cambios en ambos *mixes* energéticos (primarios y finales) para el conjunto de la muestra de países (en el cuadro n.º 3 de la sección quinta, punto 2). De esta manera, respecto al *mix* primario exploramos el movimiento desde el petróleo (la omitida) hacia carbón, gas natural, nuclear o renovables, con la identificación de parámetros que corresponde al modelo teórico de la sección tercera. Finalmente, extendemos la especificación para analizar el papel de los cambios en la composición sectorial de consumo energético final que se recoge en los datos que utilizamos: el paso de consumo en el sector primario (la omitida) a consumo en el sector residencial, industrial, transporte o comercio y servicios.

En el bloque de estimaciones de la sección quinta, punto 2, puesto que las estimaciones tipo *pooled-OLS* son sensibles a sesgos de endogeneidad de las variables explicativas, mostramos también los resultados para una estimación en dos etapas tipo *System GMM* (Arellano y Bover, 1995; Blundell y Bond, 1998). La validez de los instrumentos del *System GMM* se contrasta con un test J de Hansen de sobreidentificación. Además, la proliferación de instrumentos tiende a introducir problemas adicionales de sobreidentificación, por lo que implementamos la reducción de instrumentos propuesta por

Roodman (2009). Con esta estrategia, al *colapsar* la matriz de instrumentos, nuestra especificación del *System GMM* limita el número de restricciones de sobreidentificación reduciendo la matriz de instrumentos a un número claramente inferior al tamaño de la sección cruzada. En la especificación del *GMM* usamos errores estándar robustos, y la matriz de varianzas y covarianzas se corrige por posibles sesgos en muestras pequeñas (Windmeiner, 2005).

V. RESULTADOS DE LAS ESTIMACIONES

1. Emisiones, economía e intensidad energética por regiones según niveles de renta

El cuadro n.º 2 resume los resultados obtenidos a partir del *pool* de datos. En todos los casos, la variable dependiente es el crecimiento anualizado (durante cinco años) de las emisiones de CO₂ por habitante, y las variables retardadas lo son en cinco años. Los cambios de la intensidad energética también están expresados en crecimientos anualizados. En todos los modelos incluimos un término constante y efectos fijos temporales. El panel de datos es incompleto y contiene un total de 849 observaciones, con 134 países entre 1975 y 2010 (cada cinco años).

Tal como se comentó anteriormente, el cuadro n.º 2 muestra las estimaciones para el modelo básico que incluye el estado de la tecnología energética para los distintos países medido por el nivel de las emisiones de CO₂ retardado, y el estado de la tecnología productiva medido por el nivel del PIB per cápita retardado. Además, estas variables explicativas en niveles se acompañan de los principales flujos que cambian en la economía a corto plazo: la intensidad energética y las fluctuaciones en el PIB medidas por su tasa de crecimiento. Así, los coeficientes asociados a estas variables pueden interpretarse como elasticidades a corto plazo de las emisiones por habitante respecto a cada una de ellas. La primera columna presenta los resultados para el total de la muestra y el resto por regiones según niveles de renta, siguiendo la clasificación del Banco Mundial, diferenciando entre países que pertenezcan o no a la OCDE en este último caso.

El bloque derecho de estimaciones deja fuera las variaciones en la intensidad energética. Para esta especificación restringida, se observa que hay evi-

dencia de convergencia en las emisiones; es decir, un mayor nivel de los valores iniciales de emisiones ($\ln[\text{CO}_2 \text{ pc}]$ retardado) está asociado (en media) a menores ritmos de crecimiento de las emisiones de CO_2 en el período posterior (cinco años). Si entramos en detalle dentro de cada grupo de países, se observa que la convergencia entre los países es superior para los países pobres, y para los ricos no-OCDE (muchos de ellos del Oriente Medio, con altas rentas derivadas de la extracción de energías fósiles).

El resultado cambia sustancialmente cuando controlamos por la variación en la intensidad energética en el segundo bloque de estimaciones del cuadro n.º 2. El grado de convergencia no es significativo para los países ricos OCDE, y se mitiga sustancialmente en todos los demás casos (nótese de nuevo el caso de los ricos no-OCDE). El coeficiente de convergencia solamente se mantiene relativamente alto (por encima del 2 por 100 anual) entre los países de niveles de renta más baja.

Algo similar ocurre con el efecto del nivel de desarrollo económico medido por el nivel del PIB per cápita retardado ($\ln[\text{PIB pc}]$, $t-1$). La variación de las emisiones está correlacionada positivamente con el nivel de partida de desarrollo para el *pool* de países, y especialmente para los países ricos no OCDE, mientras que el efecto no es significativo para los países ricos OCDE. Sin embargo, cuando controlamos por la intensidad energética, el efecto del nivel de riqueza del país solo es significativo en el agregado, mostrando una vez más la importancia que tiene la intensidad energética para explicar las correlaciones existentes entre las emisiones de CO_2 y los niveles de actividad de las economías.

Este resultado se complementa con la importancia de la capacidad explicativa de la variación en la actividad económica a corto plazo. El efecto de las fluctuaciones a corto plazo es positivo en todos los casos y se ve reforzado cuando controlamos por los cambios en la intensidad energética. La existencia de una correlación negativa muy fuerte entre cambios en la intensidad energética y el crecimiento económico (Díaz *et al.*, 2019) hace que la omisión de la variable energética en el modelo de emisiones sesgue fuertemente a la baja el coeficiente (elasticidad a corto plazo) de los cambios en la actividad económica sobre el crecimiento del CO_2 por habitante. Así, por ejemplo, pasamos de tener una estimación de la elasticidad de corto plazo PIB-emisiones de 0,48 (para todo el *pool*) a una de 1,13

al incluir la intensidad energética; un resultado más en la línea de lo discutido en las secciones anteriores. De hecho, las elasticidades son todas mayores o muy próximas a uno cuando se controla por los cambios en la intensidad energética, y esta tiende a reducirse con el nivel de riqueza, en la línea de lo comentado en la sección segunda. Cuantitativamente, también es muy relevante resaltar los niveles de las elasticidades de corto plazo de la intensidad energética sobre las emisiones de CO_2 . Para todos los países esta es prácticamente igual a 1, mientras que para los países de renta media-baja y media alta supera incluso la unidad. Sin embargo, para los más pobres y para los más ricos es algo inferior a la unidad. En todos los casos las estimaciones rondan la elasticidad unitaria. Esto implica que reducir la intensidad energética en un 1 por 100 conllevaría una reducción similar en las emisiones de CO_2 por habitante. Esta elasticidad podría compensar el aumento de las emisiones proveniente del aumento de la actividad económica, que muestra una elasticidad incluso superior a la unidad en la mayoría de los casos.

Además de lo ya analizado, interpretamos estos resultados como evidencia de la importancia del modelo energético representado por la variación en la intensidad energética como un aspecto crucial para entender la evolución de las emisiones de CO_2 a nivel mundial y por regiones del mundo. Así, la intensidad energética en la regresión capta (parcialmente) la capacidad explicativa del nivel del PIB (y de sus crecimientos), y el patrón de convergencia en emisiones entre países. Con este control relativo a la tecnología energética, el determinante más importante del aumento de las emisiones es el crecimiento del PIB a corto plazo.

En definitiva, de acuerdo con la discusión anterior y los resultados de las regresiones del cuadro n.º 2, concluimos que la evidencia preliminar sugiere que la variación de las emisiones a largo plazo (la pendiente de la recta de regresión) está determinada por el crecimiento del PIB y por el uso de energía, y no tanto por el estado de la economía. Por tanto, el resultado de convergencia, es decir, de reducción de emisiones para aquellos países que han contaminado más en el pasado, se debilita al incorporar la variable de intensidad energética. En definitiva, nuestros resultados sugieren que los patrones de emisiones de CO_2 están fundamentalmente gobernados por la tecnología energética representada por las diferencias de intensidad energética entre países con distintos niveles de desarrollo.

CUADRO N.º 2

EMISIONES DE CO₂, CRECIMIENTO E INTENSIDAD ENERGÉTICA POR REGIONES DEL MUNDO SEGÚN NIVELES DE RENTA: RESULTADOS *POOL-OLS*

REGIONES (POR NIVELES DE RENTA), SEGÚN BANCO MUNDIAL	TODOS	RENDA BAJA	RENDA MEDIA-BAJA	RENDA MEDIA-ALTA	RENDA ALTA (NO-OCDE)	RENDA ALTA (OCDE)	TODOS	RENDA BAJA	RENDA MEDIA-BAJA	RENDA MEDIA-ALTA	RENDA ALTA (NO-OCDE)	RENDA ALTA (OCDE)
ln (CO ₂ pc, t-1)	-0,0226*** (-6,84)	-0,0351*** (-3,09)	-0,0217*** (-4,50)	-0,0274*** (-4,39)	-0,0389*** (-4,83)	-0,0219*** (-4,28)	-0,0102*** (-4,63)	-0,0239*** (-1,74)	-0,0138*** (-4,54)	-0,0686*** (-2,84)	-0,0113*** (-2,45)	-0,0518*** (-1,31)
Crecimiento PIBpc	0,482*** (8,74)	0,847*** (4,60)	0,431*** (4,67)	0,495*** (5,50)	0,185*** (1,91)	0,491*** (4,54)	1,130*** (26,94)	1,454*** (11,50)	1,205*** (19,53)	1,132*** (18,45)	0,838*** (11,31)	0,907*** (9,29)
ln (PIBpc), t-1	0,0260*** (5,82)	0,0404* (1,80)	0,0184** (1,99)	0,0254* (1,85)	0,0257*** (2,88)	0,00766 (1,02)	0,0748*** (3,24)	0,0326 (1,40)	0,0166** (2,58)	0,000653 (0,14)	0,00825* (1,91)	0,000351 (0,09)
Crecimiento IE							0,989*** (20,40)	0,879*** (3,54)	1,045*** (15,89)	1,099*** (15,31)	0,799*** (10,51)	0,714*** (4,36)
Núm. Observ.	849	97	194	250	103	205	849	97	194	250	103	205
R2-ajustado	0,312	0,530	0,359	0,348	0,461	0,430	0,696	0,617	0,708	0,842	0,842	0,669

Notas: Estadísticos *t-student* robustos se muestran en paréntesis. Panel no-balanceado con 134 países entre 1975 y 2010 (cada cinco años). La variable dependiente es el crecimiento anualizado (durante cinco años) de las emisiones de CO₂ por habitante (crecimiento medido en diferencias logarítmicas). Los cambios de la intensidad energética también están expresados en crecimientos anualizados. Las variables retardadas lo son en cinco años. Un término constante y efectos fijos temporales son incluidos en todos los modelos (las estimaciones no se muestran en el cuadro). Significación: 10% (*); 5% (**) y 1% (***)

Por supuesto, los argumentos anteriores se basan exclusivamente en la evidencia de sección cruzada, por lo que deben interpretarse como una primera aproximación. Para organizar la evidencia a nivel de la economía mundial con mayor precisión vamos a extraer dos observaciones adicionales. En primer lugar, hemos explorado la relación entre emisiones de CO₂ y el nivel del PIB, y hemos visto que dicha relación parece modificarse a lo largo de las etapas de desarrollo de los distintos países. En segundo lugar, cuando consideramos la dinámica de las emisiones de CO₂, y controlamos por los niveles del PIB y su variación en el tiempo, encontramos que el posible efecto de los niveles, tanto del PIB como de emisiones de CO₂, en los cambios de las emisiones se mitiga y, en su lugar, se explica fundamentalmente por los cambios en el PIB y de la intensidad energética. Respecto a este último resultado, según la teoría descrita en la sección tercera y apoyándonos en los trabajos previos de Marrero (2010) y Díaz *et al.* (2019), los cambios en el *mix* energético (tanto primarios como finales) pueden ser una pieza clave para explicar las diferencias en la dinámica de las emisiones de CO₂ (y de actividad económica) entre países. Este aspecto lo abordamos en la siguiente sección.

2. Emisiones, economía, intensidad energética y *mix* energético

En esta sección añadimos como variables explicativas en nuestro análisis anterior los cambios en el

mix de consumo de energía por fuentes primarias y por sectores de actividad finales para el conjunto de nuestra muestra. El cuadro n.º 3 muestra las estimaciones de mínimos cuadrados ordinarios para el pool de datos con efectos fijos regionales y temporales (lado izquierdo de del cuadro), junto a las estimaciones obtenidas usando el método del *System-GMM* (lado derecho del cuadro). Las estimaciones corresponden a la relación entre las emisiones de CO₂ a nivel mundial y su variación temporal, cuando se controla por las variables de actividad macroeconómica y por variables energéticas. En cada lado del cuadro, las columnas 1, 2 y 3 incorporan, respectivamente, los cambios solo en el *mix* energético primario, o solo en el final o en ambos.

Usando el método *pool-OLS*, los coeficientes de las principales variables agregadas, como el término de convergencia de emisiones (el retardo del ln[CO₂ pc], el nivel de actividad ln[GDP pc] y crecimiento del PIB), se reducen ligeramente al incorporar las variables del *mix* energético en las estimaciones, especialmente del primario. Esto vuelve a ser consistente con lo encontrado en el cuadro anterior, cuando comparábamos la columna 1 con la 7 y veíamos que la introducción de los cambios en la intensidad energética tenía un efecto muy significativo en las estimaciones de las demás variables. En este sentido, la omisión de las variables energéticas en el modelo puede introducir, entre otras cosas, sesgos importantes en las estimaciones en el resto de variables.

Las estimaciones de las elasticidades relacionadas con el crecimiento económico y con la intensidad energética se ven reducidas al introducir los cambios en el *mix* energético primario (pocos cambios cuando se introducen los cambios en el *mix* final). Nótese que ahora (columna 1 y 3 en cada bloque) las estimaciones de la elasticidad a corto plazo son inferiores a la unidad, aunque siguen siendo próximas a este valor. Aunque no hacemos un análisis detallado sobre este aspecto y el efecto no es muy notable, este resultado apunta a que aquellas economías que cambian el *mix* hacia fuentes más limpias también son las que están haciendo un mayor esfuerzo en reducir la intensidad energética. Por su parte, incorporar en el modelo los cambios en el *mix* energético final no modifica la estimación excepto quizás en cuanto al papel del mecanismo de convergencia en las emisiones que hemos analizado en la sección anterior.

Concretamente, respecto a los efectos de cambios en el *mix* primario sobre las emisiones, nos centramos, principalmente, en las estimaciones de la columna 3. Los coeficientes no sufren cambios muy notables si comparamos la columna 1 con la 3, y la 2 con la 3 en cada caso. Al comparar los resultados del *pool*-OLS con los del *System GMM*, cualitativamente no hay muchos cambios, aunque sí se observa que los coeficientes estimados para las renovables y la nuclear aumentan (en magnitud), mientras que los del carbón disminuyen y el del gas se mantiene, pero se hace no significativo. En cualquier caso, los resultados principales son robustos: sustituir petróleo por renovables, nuclear o gas natural favorecería una reducción de las emisiones per cápita, mientras que moverse a carbón las aumentaría.

Cuantitativamente, la evidencia encontrada es relevante: la mayor reducción de emisiones proviene de sustituir petróleo por energías renovables, mientras que, en la dirección opuesta, está moverse hacia aumentar el peso en el *mix* del carbón. Por su parte, sustituir petróleo por gas natural supone una mejora moderada de las emisiones, mientras que un incremento del peso de la energía nuclear en el *mix* primario resulta en una situación intermedia.

Si nos centramos en las estimaciones de la columna 3 del *System GMM*, concluimos que los resultados apuntan a que un cambio en un punto porcentual anual de petróleo a renovables (que es aproximadamente una desviación estándar de los cambios en renovables en nuestra muestra) estaría asociado, *ceteris paribus*, con una caída en las

emisiones por habitante (anual) de 1,85 por 100. Si multiplicamos el coeficiente estimado (-1,85) por la media de la ratio de renovables sobre el total en nuestra muestra, que es de 0,29, el valor resultante, -0,55, nos daría una medida aproximada de la elasticidad en el valor medio. En suma, cuantitativamente, los resultados son muy significativos.

Respecto a los cambios en los consumos de energía por los diferentes sectores finales, obtenemos evidencia de que una vez que controlamos por la intensidad energética de los distintos países en el panel, junto al resto de controles básico, solo son significativos para las emisiones de CO₂ los aumentos de la participación de la demanda energética del sector transporte (recordemos que el sector omitido es el primario) y, menos claro, del sector industrial. Es interesante observar que el efecto de cambios en el *mix* final se reparte entre el transporte y moderadamente la industria al controlar simultáneamente por el *mix* primario y la intensidad energética.

Por su parte, la estimación que proporciona la metodología de *System GMM* no modifica sustancialmente (al menos cualitativamente) los resultados en relación con los cambios en los *mix* energéticos (primario y final), tal como ya hemos comentado. Sin embargo, sí encontramos algunas diferencias importantes a destacar. En primer lugar, el parámetro de convergencia de las emisiones se reduce de manera importante, dejando de ser significativo en todas las especificaciones cuando usamos el *System GMM*. Esto refuerza la idea ya analizada anteriormente. Detrás del proceso de convergencia en emisiones entre los países, se encuentra la dinámica de la energía (la intensidad energética y el *mix* primario, más concretamente). Una vez se controla por estas variables, la evidencia de convergencia desaparece. Lo mismo ocurre con el nivel inicial de la actividad económica (el PIB per cápita en $t-1$). Nuestra mejor estimación del *System GMM* muestra que este aspecto no es relevante para explicar las emisiones una vez consideramos los aspectos energéticos en el modelo.

En definitiva, nuestros resultados ponen de manifiesto que las políticas contra el cambio climático deberían dirigirse principalmente a impulsar la eficiencia energética y a disminuir el peso de la demanda energética del sector transporte, principalmente. Además, incrementar en el *mix* primario la participación de las energías renovables tiene efectos verdaderamente significativos sobre la reducción de las emisiones de CO₂, y frente a cualquier alternativa.

CUADRO N.º 3

EMISIONES DE CO₂, CRECIMIENTO, INTENSIDAD ENERGÉTICA Y CAMBIOS EN EL MIX PRIMARIO Y FINAL: POOL-OLS & SYSTEM GMM

	Pool-OLS (EFECTOS FIJOS TEMPORALES Y REGIONALES)			SYSTEM GMM (+++), COLAPSAR INSTRUMENTOS		
ln (CO ₂ pc, t-1)	-0,00922*** (-4,49)	-0,00984*** (-3,70)	-0,00845*** (-3,96)	-0,00142 (-0,38)	-0,00886 (-1,38)	-0,00234 (-0,65)
ln (PIBpc), t-1	0,00760*** (3,94)	0,00728*** (2,62)	0,00740*** (3,31)	0,000858 (0,19)	0,00676 (1,04)	0,00186 (0,40)
Crecimiento PIBpc	0,918*** (20,87)	1,045*** (19,69)	0,910*** (24,81)	0,912*** (15,45)	1,041*** (14,62)	0,918*** (19,78)
Crecimiento IE	0,816*** (18,31)	0,940*** (19,74)	0,820*** (22,61)	0,842*** (16,50)	0,950*** (12,93)	0,856*** (19,59)
Carbón, cambios en ratio (+)	0,509*** (4,92)		0,616*** (5,24)	0,370*** (3,58)		0,560*** (3,52)
Gas, cambios en ratio (+)	-0,291*** (-2,79)		-0,240** (-2,17)	-0,402*** (-2,77)		-0,243 (-1,50)
Nuclear, cambios en ratio (+)	-1,082*** (-8,55)		-1,161*** (-7,62)	-1,210*** (-6,05)		-1,344*** (-5,83)
Renovables, cambios en ratio (+)	-1,665*** (-4,56)		-1,562*** (-3,97)	-1,928*** (-6,05)		-1,850*** (-4,22)
Residencial, cambios en ratio (+++)		-0,177 (-0,39)	0,210 (0,55)		-0,344 (-0,96)	0,310 (0,84)
Industrial, cambios en ratio (+++)		0,409 (1,56)	0,455** (2,33)		0,363 (1,48)	0,487*** (2,81)
Transporte, cambios en ratio (+++)		0,923** (2,43)	0,722*** (2,72)		0,672** (2,13)	0,616* (1,93)
Comercio & servicios, cambios en ratio (+++)		0,389 (1,45)	0,0820 (0,42)		0,327 (1,21)	0,171 (0,78)
Número observaciones	849	849	849	849	849	849
R2-ajustado	0,803	0,723	0,813			
Hansen (p-val) (+++)				0,309	0,0711	0,324
m1-test (p-val)				0,000	0,000	0,000
m2-test (p-val)				0,530	0,288	0,588
Número de países				136	136	136
Número de instrumentos				69	69	101

Notas: Estadísticos *t-student* robustos se muestran en paréntesis. Panel no-balanceado con 134 países entre 1975 y 2010 (cada cinco años). Significación: 10 por 100 (*); 5 por 100 (**) y 1 por 100 (***).

La variable dependiente es el crecimiento anualizado (durante cinco años) de las emisiones de CO₂ por habitante (crecimiento medido en diferencias logarítmicas). Las variables retardadas lo son en cinco años. Un término constante y efectos fijos temporales (y regionales en el pool-OLS) son incluidos en todos los modelos (las estimaciones no se muestran en la tabla). El crecimiento del PIB y los cambios de la intensidad energética también están expresados en crecimientos anualizados.

(+): Los cambios en la participación del petróleo es la categoría omitida.

(++): Los cambios en el sector primario y otros es la categoría omitida.

(+++): System-GMM es estimado usando el estimador 2-steps, usando todos los retardos pero colapsando la matriz de instrumentos (Roodman, 2009). La matriz de varianzas-covarianzas está corregida por sesgos de tamaño muestral pequeños (Windmeiner, 2005).

Los estadísticos m1 y m2 se refieren a la correlación de primer y segundo orden en las primeras diferencias de los residuos. Para una correcta especificación, se necesita un *p*-valor del m1 inferior a 0,10 y uno del m2 superior a 0,1. El test de Hansen de sobreidentificación se distribuye asintóticamente como una chi-cuadrado con grados de libertad igual al número de parámetros a estimar. El *p*-valor está asociado a la hipótesis nula de validez de los instrumentos. Un *p*-valor superior a 0,1 es síntoma de validez de los instrumentos.

VI. CONCLUSIONES

Este trabajo estudia los canales más importantes a través de los cuales la actividad económica afecta al nivel de emisiones de CO₂ a la atmósfera. El control efectivo de las emisiones de CO₂ pasa por conocer y entender dichos canales.

La lucha contra el cambio climático necesita un conocimiento efectivo de la conexión entre

actividad económica y nivel de emisiones de CO₂. Este trabajo pone de manifiesto los mecanismos más importantes de esta conexión. *Ceteris paribus*, observamos que el crecimiento del PIB determina el crecimiento de las emisiones, pero que las mejoras tecnológicas las reducen. En el problema que nos ocupa, el progreso tecnológico tiene dos dimensiones: mejoras en eficiencia energética (de forma equivalente, la reducción en la intensidad energética por unidad de valor añadido) y mejoras en la

descarbonización del uso energético. El aumento en la eficiencia energética se produce, fundamentalmente, en los sectores finales (es significativo el caso del transporte) mientras que la descarbonización apunta al sector energético y a sectores finales como el transporte y, en menor medida, la industria. Es importante hacer esta distinción, porque los canales a través de los que operan estas mejoras tecnológicas son distintos. La eficiencia energética está incorporada a los bienes de capital, como arguyen Díaz y Puch (2019a). Una mejora sustancial en la eficiencia energética total necesitará de un cambio masivo en las formas de inversión. La mejora en la descarbonización apunta directamente a la transición hacia energías de origen renovables. Sendas formas de progreso tecnológico tendrán consecuencias importantes en el agregado puesto que ambos sectores (energía y transporte) tienen un peso significativo en el empleo y la inversión agregada, además de afectar indirectamente al resto de la economía. Por ejemplo, en España en 2017, estos dos sectores crearon el 5,66 por 100 de todos los puestos de trabajo y su inversión constituía el 14,31 por 100 de la total. Cualquier estudio que pretenda evaluar el impacto en el corto plazo de políticas para impulsar la eficiencia y la descarbonización de la economía deberá tener en cuenta el peso de estos dos sectores.

NOTAS

(*) Otra afiliación: ICAE.

(1) Véase el informe *Perspectives for the Energy Transition. The Role of Energy Efficiency*, IEA, 2018.

(2) Para una definición del «efecto rebote» véase GILLINGHAM *et al.* (2016).

BIBLIOGRAFÍA

- ÁLVAREZ, F., MARRERO, G. A. y PUCH, L. A. (2005). Air pollution and the macroeconomy across European countries. *Documento de trabajo FEDEA*, núm. 10.
- ATKESON, A. y KEHOE, P. J. (1999). Models of Energy Use: Putty-Putty versus Putty-Clay. *American Economic Review*, 89(4), pp. 1028-1043.
- BROCK, W. A. y TAYLOR, M. S. (2005). Economic Growth and the Environment: A Review of Theory and Empirics. En P. AGHION y S. DURLAUF (ed.), *Handbook of Economic Growth*, 1.ª ed., volumen 1, capítulo 28, pp. 1749-1821. Elsevier.
- DÍAZ, A., MARRERO, G. A. y PUCH, L. A. (2016). CO₂ Emissions, Energy Technologies and the Macroeconomy. Mimeo, Universidad Carlos III de Madrid.

- (2020). CO₂ Emissions, Energy Transition and Technical Change. Mimeo, Universidad Carlos III de Madrid.
- DÍAZ, A., MARRERO, G. A., PUCH, L. A. y RODRÍGUEZ-LÓPEZ, J. (2019). Economic Growth, Energy Intensity and The Energy Mix. *Energy Economics*, 81(C), pp. 1056-1077. Elsevier.
- DÍAZ, A. y PUCH, L. A. (2019a). Investment, Technological Progress and Energy Efficiency. *The B.E. Journal of Macroeconomics*, 19(2), pp. 1-28. De Gruyter.
- (2019b). Vintage Capital Investment and Energy Use Fluctuations. Mimeo, Universidad Carlos III de Madrid.
- DÍAZ, A., PUCH, L. A. y GUILLÓ, M. D. (2004). Costly Capital Reallocation and Energy Use. *Review of Economic Dynamics*, 7(2), pp. 494-518.
- GILLINGHAM, K., RAPSON, D. y WAGNER, G. (2016). The Rebound Effect and Energy Efficiency Policy. *Review of Environmental Economics and Policy*, 10(1), pp. 68-88.
- GOLOSOV, M., HASSLER, J., KRUSELL, P. y TSYVINSKI, A. (2014). Optimal Taxes on Fossil Fuel in General Equilibrium. *Econometrica*, 82(1), pp. 41-88.
- GÓMEZ-LÓPEZ, C. S. y PUCH, L. A. (2012). Uso, Precio y Gasto de Energía en la Economía Mexicana. *EconoQuantum, Revista de Economía y Negocios*, 9(2), pp. 123-139. Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de Ciencias Económico Administrativas, Departamento de Métodos Cuantitativos y Maestría en Economía.
- GONZÁLEZ, R. M., MARRERO, G. A., RODRÍGUEZ-LÓPEZ, J. y MARRERO, A. S. (2019). Analyzing CO₂ Emissions from Passenger Cars in Europe: A Dynamic Panel Data Approach. *Energy Policy*, 129(C), pp. 1271-1281.
- GUERRERO-LEMUS, R., MARRERO, G. A. y PUCH, L. A. (2012). Costs for Conventional and Renewable Fuels and Electricity in the Worldwide Transport Sector: A Mean-Variance Portfolio Approach. *Energy*, 44(1), pp. 178-188.
- GUTIÉRREZ, L. F., MARRERO, G. A., y PUCH, L. A. (2010). Los efectos medioambientales del boom y el parón inmobiliario. *Economic Reports*, 01-2010. FEDEA.
- HASSLER, J. y KRUSELL, P. (2012). Economics And Climate Change: Integrated Assessment In A Multi-Region World. *Journal of the European Economic Association*, 10(5), pp. 974-1000.
- HASSLER, J., KRUSELL, P., OLOVSSON, C. y REITER, M. (2019). *Integrated Assessment in a Multi-region World with Multiple Energy Sources and Endogenous Technical Change*. Mimeo. Stockholm University.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (2018). *Perspectives for the Energy Transition: The Role of Energy Efficiency*. París: IEA. <https://webstore.iea.org/perspectives-for-the-energy-transition-the-role-of-energy-efficiency>
- (2019). *Global Energy & CO₂ Status Report 2019*. París: IEA. <https://www.iea.org/reports/global-energy-and-CO2-status-report-2019>

- MARRERO, G. A. (2010). Greenhouse Gases Emissions, Growth and the Energy Mix in Europe. *Energy Economics*, 32(6), pp. 1356-1363.
- MARRERO, G. A., PUCH, L. A. y RAMOS-REAL, F. J. (2015). Mean-Variance Portfolio Methods for Energy Policy Risk Management. *International Review of Economics & Finance*, 40(C), pp. 246-264.
- MARRERO, G.A., RODRÍGUEZ-LÓPEZ, J. y GONZÁLEZ-MARRERO, R. M. (2019). Dieselization, CO2 emissions and fuel taxes in Europe. *SERIEs (Journal of the Spanish Economic Association)*. <https://doi.org/10.1007/s13209-019-00210-3>
- NORDHAUS, W. (1974). Resources as a Constraint on Growth. *The American Economic Review*, 64(2), pp. 22-26.
- (1975). Can We Control Carbon Dioxide? *IIAASA Working Paper*, pp. 75-63. Vienna, Austria.
- NORDHAUS, W. D. (1977). Economic Growth and Climate: The Case of Carbon Dioxide. *American Economic Review*, 67(1), pp. 341-346.
- (1994a). *Managing the Global Commons: The Economics of Climate Change*, 31. Cambridge, MA: MIT Press.
- (1994b). Expert Opinion on Climate Change. *American Scientist*, 82, pp. 920-937.
- (2013). Integrated Economic and Climate Modeling. *Handbook of CGE Modeling*, cap. 16, vol. 1. Amsterdam: Elsevier.
- (2014). Estimates of the Social Cost of Carbon: Concepts and Results from the DICE-2013R Model and Alternative Approaches. *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, 1, pp. 273-312.
- (2017). Projections and Uncertainties about Climate Change in an Era of Minimal Climate Policies. *NBER Working Papers*, 22933.
- (2018). Evolution of Modeling of the Economics of Global Warming: Changes in the DICE model, 1992-2017. *NBER Working Papers*, 23319.
- NORDHAUS, W. D. y BOYER, J. (2000). *Warming the World: Economic Models of Global Warming*. Cambridge, MA: MIT Press.
- NORDHAUS, W. D. y Z. YANG (1996). A Regional Dynamic General-Equilibrium Model of Alternative Climate-Change Strategies. *American Economic Review*, 86(4), pp. 741-765.
- PINDYCK, R. S. y ROTEMBERG, J. (1983). Dynamic Factor Demands and the Effects of Energy Price Shocks. *American Economic Review*, 73, pp. 1066-1079.