

---

# Una nueva perspectiva de la I+D: su influencia en la evolución de las emisiones de CO<sub>2</sub>

## **Yolanda Fernández Fernández**

Profesora de Teoría Económica en la Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales de la Universidad Autónoma de Madrid (UAM) desde 1988. Profesor contratado doctor en esta universidad desde 2004.

Sus trabajos de investigación se han centrado principalmente en la economía de la cultura, del transporte y medio ambiente. Ha publicado libros, documentos profesionales y artículos en los campos citados. Ha participado en distintos proyectos de investigación y ha impartido cursos, seminarios de formación y conferencias en instituciones públicas y privadas.

## **M<sup>a</sup> Ángeles Fernández López**

Ha desarrollado su trabajo en las universidades Autónoma y CEU San Pablo de Madrid, Católica de Ávila y South Bank de Londres. En la actualidad trabaja como profesora adjunta en la Universidad Camilo José Cela. Dentro del ámbito de la teoría económica, sus trabajos de investigación se han centrado principalmente en economía de la energía y medio ambiente, con numerosas publicaciones y proyectos de investigación.

## **Blanca Olmedillas Blanco**

Profesora de Teoría Económica en la Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales de la Universidad Autónoma de Madrid (UAM) desde 1989. Profesor contratado doctor en esta universidad desde 2004.

Ha impartido diversos cursos y seminarios de formación y ha dictado conferencias en instituciones universitarias, públicas y privadas. Sus investigaciones y publicaciones se centran en el estudio de las externalidades, fundamentalmente en el ámbito del medio ambiente.

## RESUMEN

La economía ha mostrado un creciente interés, a lo largo del siglo XX, por el estudio de la relación entre crecimiento económico y emisiones contaminantes. Tratando de profundizar en la relación entre indicadores ambientales y PIB, nuestro trabajo pretende estudiar la relevancia del gasto en I+D como factor explicativo de la evolución de las emisiones de CO<sub>2</sub>. La idea subyacente es que la innovación tecnológica, en muchos casos asociada a ahorros energéticos en la producción y el consumo, podría compensar el efecto del crecimiento económico. En este contexto, la novedad de este trabajo es que pretende estudiar la influencia de la innovación (a través del gasto en I+D) como factor explicativo de la evolución de las emisiones de CO<sub>2</sub> y hasta qué punto está compensando y puede compensar en un futuro el aumento del PIB. De forma adicional, puede poner de manifiesto la relevancia o no de las políticas de innovación desde una óptica poco valorada hasta ahora como son sus consecuencias sobre el medioambiente.

Para ello, y utilizando como metodología la descomposición factorial de las emisiones de CO<sub>2</sub>, se analizan los casos de la Unión Europea, Estados Unidos y China entre 1996 y 2012. Esto permitirá observar y comparar los indicadores de zonas con actitudes dispares en lo que a la preservación del medioambiente se refiere.

Los resultados muestran que el gasto en I+D es fundamental como impulsor del desarrollo sostenible, donde el crecimiento se compagina con menores emisiones de CO<sub>2</sub>.

## PALABRAS CLAVE

I+D, Emisiones de CO<sub>2</sub>, cambio tecnológico.

## ABSTRACT

The economy has showed an increasing interest, throughout the 20th century, on the study of the relationship between economic growth and polluting emissions. Trying to deepen in the relation among environmental indicators and GDP, our work aims to study the importance of R&D expenditure as an explanatory factor of the CO<sub>2</sub> emissions. The underlying idea is that technological innovation, in many cases associated with energy savings in production and consumption, could offset the effect of economic growth on emissions. In this context, the novelty of this research is to try to study the influence of innovation (using R&D expenditure) as an explanatory factor of the

CO2 emissions, and to what extent it is compensating and it can compensate in a future the GDP growth. Additionally, this work can highlight the relevance or otherwise of innovation policies from an underrated perspective so far, their consequences on environment.

To that end and using a factorial decomposition analysis of the emissions of CO2, the cases of European Union, United States and China are analyzed from 1996 to 2012. This will allow to observe and compare the indicators of these areas, which have different attitudes in relation to environmental preservation.

The results show that R&D expenditure is fundamental as a driver of sustainable development, where economic growth is combined with less CO2 emissions.

## **KEYWORDS**

R&D, CO<sub>2</sub> emissions, technological change.

## **JEL**

Q55, Q56, F64.

## 1. INTRODUCCIÓN

El problema del cambio climático es un hecho incuestionable, pero a pesar de existir evidencias científicas<sup>1</sup> respecto a la influencia perversa de la actividad humana en el medio ambiente mundial, existe un conocimiento limitado sobre las fuerzas motrices concretas de tal impacto. Además, el cambio climático es un problema complejo ya que afecta a todo el mundo y está estrechamente relacionado con temas de gran importancia para las sociedades, como el crecimiento económico y demográfico.

Para enfrentarse a este problema y conseguir reducir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) antropogénicas y restringir sus efectos se firma en 1997 el Protocolo de Kioto, comprometiéndose a los países firmantes a limitar sus emisiones de GEI en las cantidades atribuidas a los mismos y consignadas en el anexo B del Protocolo. La actualidad viene enmarcada en la firma del Acuerdo de París<sup>2</sup>. Este acuerdo plantea reducir las emisiones de carbono para poder mantener el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de 2°C con respecto a los niveles preindustriales (UNFCCC, 2015), pero no explicita ningún límite a las emisiones por país ni condiciona la forma de conseguirlo.

El Quinto informe del IPCC ha puesto de manifiesto la relevancia de la tecnología y prácticas de mitigación en la evolución de las emisiones en el medio plazo. También indica expresamente que, a largo plazo, para lograr las metas de estabilización de las emisiones, son precisas inversiones en tecnologías de bajas emisiones de GEI y mejoras tecnológicas mediante investigación (IPCC, 2014b, p. 16-17).

---

1 Sobre las evidencias científicas, ver el Quinto Informe de Evaluación del IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) que se creó en 1988 con la finalidad de proporcionar evaluaciones integrales del estado de los conocimientos científicos, técnicos y socioeconómicos sobre el cambio climático, sus causas, posibles repercusiones y estrategias de respuesta. El quinto informe está compuesto a su vez por tres informes, elaborados por sendos grupos de trabajo: Grupo I: Bases físicas; Grupo II: Impacto, adaptación y vulnerabilidad; Grupo III: Mitigación del cambio climático, además de un informe de síntesis. (IPCC, 2013, 2014a, 2014b).

2 El Acuerdo de París es un conjunto de decisiones tomadas por la comunidad internacional para hacer frente al reto a largo plazo del cambio climático de manera colectiva y completa en el futuro. El acuerdo, alcanzado el 12 de diciembre de 2015 en París, Francia, durante la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, ha comenzado su firma el 22 de abril de 2016 y puede ser firmado por las partes a lo largo de un año. En la actualidad lo han firmado 175, entre los que se encuentran China, Estados Unidos y los países de la Unión Europea de los 15, regiones en las que se centra este trabajo. <http://www.un.org/sustainabledevelopment/blog/2016/04/parisagreementsingatures/> (última consulta: 31-05-2016).

En este sentido, Levinson (2009) considera en su estudio empírico que la tecnología es la causante de que en USA desde 1987 a 2001 la producción industrial haya crecido un 24% mientras que las emisiones han disminuido un 25%. King (2004) encuentra cambios similares para Europa y Asia. Tarancón y del Río (2004) proponen una nueva metodología de estudio sobre la contribución de los distintos sectores productivos a las emisiones de CO<sub>2</sub>. Otros estudios empíricos analizan el esfuerzo innovador de los agentes económicos sobre el medioambiente (Fisher-Vanden *et al*, 2004; Ruiz, 2010; Cantos y Balsalobre, 2013 y Balsalobre, Álvarez y Baños, 2016).

Aunque se ha generalizado la idea de que la innovación tecnológica ha de ser el instrumento clave para alcanzar un crecimiento económico sostenible que no deteriore el medio ambiente (o al menos que reduzca las emisiones contaminantes), también se ha planteado el uso de diferentes instrumentos económicos con el fin de fomentarla. Desde el siglo pasado se han venido diseñando y poniendo en marcha distintos instrumentos, entre los que cabe destacar el comercio de derechos de emisión. La idea es limitar las emisiones por medio de la asignación de derechos de emisión, provocando escasez, de modo que pueda desarrollarse un mercado operativo. Al poner precio a las emisiones, podría resultar menos costoso incluir tecnología menos emisora, por lo que, a su vez, fomentaría la innovación tecnológica y redundaría en una reducción real de las emisiones totales<sup>3</sup>.

Teniendo en cuenta lo anterior, muchos han sido los estudios, teóricos y empíricos, que, desde los años noventa, se han centrado en analizar las relaciones entre la actividad económica y las emisiones de GEI con el fin de disponer de información que permita diseñar políticas dirigidas a disminuir o al menos a limitar las emisiones<sup>4</sup>.

Con este interés, gran parte de la literatura se ha centrado en tratar de determinar cuáles son los factores explicativos de la evolución de las emisiones por unidad de producción. El debate se ha centrado en tratar de determinar si la intensidad energética juega un papel más o menos significativo que el índice de carbonización, para explicar la evolución de la intensidad emisora<sup>5</sup>.

3 Ver, entre otros, Fernández et al. (2014, 2015b) sobre el objetivo y los efectos del comercio de derechos de emisión europeo.

4 Existe un amplio debate sobre la relación entre crecimiento económico y medio ambiente basado en la teoría de la curva de Kuznets. Ver, entre otros, Ekins (1997), de Bruyn y Heintz (1999), Stern y Common (2001); Roca et al. (2001), Roca y Alcántara (2001), Roca y Padilla (2003), Díaz-Vázquez, (2009), Cantos y Balsalobre, 2013 y Balsalobre, Álvarez y Baños (2016).

5 Mielnik y Goldemberg (1999), consideran que el factor de carbonización es un indicador mucho más interesante que la intensidad energética para estudiar la contribución de los países al cambio climático. Por el contrario, Ang (1999), considera que es la intensidad

En este marco se encuadra este trabajo, cuyo objetivo es estudiar la influencia de la innovación en la evolución de la intensidad emisora. Para ello se utiliza una metodología de descomposición factorial, que es ampliamente utilizada en el ámbito de la economía medio ambiental.

Concretamente, en este trabajo se ha descompuesto la intensidad energética en dos factores: el factor de transformación y la intensidad innovadora. Para ello se ha considerado el gasto en I+D como indicador de la innovación en una economía, incluyendo tanto el gasto público como el privado<sup>6</sup>. Conviene señalar que se ha tenido en cuenta el gasto en I+D en sentido amplio por dos razones:

- Por una parte, para que sea consistente con el resto de las variables utilizadas, todas ellas agregados macroeconómicos (nivel de producción, consumo energético y emisiones de CO<sub>2</sub>).
- Por otra, para estudiar si todo el gasto en I+D, aunque no tenga como objetivo prioritario reducir las emisiones, puede conducir a mejoras medioambientales. En este caso conviene señalar que los efectos finales de la innovación y el cambio tecnológico generados por el gasto en I+D no son fácilmente previsibles, pudiendo provocar el denominado "efecto rebote"<sup>7</sup>.

Los resultados obtenidos, por tanto, deben ser interpretados a nivel agregado, considerando todos los efectos del gasto en I+D sobre las emisiones.

Hay que señalar que este trabajo es un estudio de economía descriptiva, cuyo objetivo es exponer y estudiar los factores explicativos más relevantes de las emisiones por unidad de producción, enfatizando el papel del gasto en I+D.

La estructura del trabajo es la siguiente: tras esta introducción, en el segundo apartado se presenta el ámbito de estudio y los datos utilizados. En el apartado

---

energética la que explica la evolución de la intensidad emisora. Una conclusión similar es la obtenida por Sun (1999) quien considera que la hipótesis de la curva de Kuznets ambiental no es más que una consecuencia de la evolución de la intensidad energética.

6 Otros trabajos interesados en la innovación y el medio ambiente utilizan variables más restrictivas, como el gasto público en I+D (ver, entre otros, Garrone y Grilli, 2010) o el gasto público en I+D+i energético (ver, entre otros, Cantos y Balsalobre, 2013; Balsalobre, Álvarez y Baños, 2016).

7 Según el efecto rebote, una mejora de la eficiencia puede conducir a incrementos en el consumo energético, compensando el ahorro que inicialmente se logra. Existe un efecto rebote *directo* comparable al efecto sustitución microeconómico, un efecto rebote *indirecto* (efecto renta) y un efecto rebote *macroeconómico*, que recoge la influencia de los cambios en el precio de la energía sobre el uso de esos factores. La cuestión clave reside en la correcta elección de medidas aplicadas para favorecer el ahorro energético así como en el precio de la energía. Para una revisión de este tipo de estudios ver Linares (2009).

tres se describe la propuesta metodológica. Los resultados obtenidos se presentan en el cuarto apartado y por último se recogen las conclusiones.

## 2. ÁMBITO DE ESTUDIO Y DATOS

Teniendo en cuenta que fundamentalmente las emisiones contaminantes provienen del consumo de energía<sup>8</sup>, la innovación puede traducirse en tecnologías menos contaminantes, en términos absolutos (reduciendo emisiones) o relativos, incidiendo en la cantidad de energía consumida por unidad de producto y/o en el tipo de energía consumida.

Con el objeto de observar si la innovación está actuando como factor reductor de las emisiones por unidad de PIB, y lo está haciendo de forma diferente en regiones con diferente sensibilidad hacia el deterioro medioambiental global, este trabajo tiene como objeto el análisis de la Unión Europea, Estados Unidos y China entre 1996 y 2012. El trabajo se centra en estas tres regiones porque, por una parte, son las principales potencias a nivel mundial y, por otra, cada una de ellas afronta de forma diferente el problema de las emisiones de CO<sub>2</sub>.

Las tres zonas consideradas suponen más del 50% de las emisiones de CO<sub>2</sub>, del PIB real y del Consumo de energía final mundiales en media para el periodo considerado. Estados Unidos y la Unión Europea entrarían en la categoría de países desarrollados, mientras que China sería clasificada como potencia en desarrollo, con una tasa de crecimiento del PIB muy superior al de las otras zonas de análisis, pero con un PIB per cápita muy inferior.

Sin entrar en una descripción y análisis exhaustivo de sus políticas de cambio climático, pues no es el objeto de este trabajo, podemos señalar que su actitud respecto a la protección medioambiental ha sido muy diferente. Así se evidencia en una revisión sucinta sobre la postura frente a Kioto de cada región y su apuesta por medidas de mercado. En concreto, la Unión Europea no sólo ha firmado el protocolo de Kioto sino que ha sido la primera región en poner en marcha el Comercio de Derechos de Emisión para el CO<sub>2</sub> en 2005. Al poner un precio a la externalidad que supone emitir CO<sub>2</sub>, las industrias más contaminantes tendrían un fuerte incentivo económico a mejorar la tecnología. Por otro lado, EE.UU, a pesar de haber mostrado interés por la reducción de las emisiones contaminantes, no firmó el protocolo de Kioto. Sin embargo, puso en marcha el primer mercado de derechos de emisión negociables para las emisiones de dióxido de carbono (NO<sub>x</sub>) y dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) en 1990. En la actualidad, diversos estados del país poseen otros sistemas de comercio

8 Según el informe de la IEA (2015), el 68% de los gases de efecto invernadero de origen antropogénico emitidos en 2010 fueron debidos al uso de energía fósil. De ellos, el 90% fueron CO<sub>2</sub>.

de permisos negociables sobre emisiones de gases de efecto invernadero<sup>9</sup>. En el caso de China, que tampoco firmó el protocolo de Kioto, hay que considerar además que ha manifestado claramente su prioridad de crecimiento aún a costa de la utilización de fuentes energéticas fósiles, de oferta limitada y muy contaminantes. Esta actitud de la economía China ha cambiado notablemente en los últimos años, posiblemente por los graves problemas medioambientales a los que se está enfrentando el país, en particular en las grandes ciudades. De hecho, se está observando una actitud mucho más participativa y activa en las negociaciones climáticas por parte de China, así como un mayor compromiso medioambiental, como muestra su intención de desarrollar su propio mercado de derechos de emisión negociables para 2017<sup>10</sup>, cuyos resultados no serán visibles a corto plazo, lo que sugiere que no es relevante para el ámbito temporal de estudio de este trabajo.

Con la intención última de observar si el comercio de derechos de emisión de la Unión Europea ha contribuido al proceso de cambio, el periodo analizado se ha dividido en dos: antes y después de 2005, año en que entra en funcionamiento el mercado de derechos de emisión de dicha región.

La información estadística de los datos utilizados en este análisis se presenta en la tabla 1. Tanto las emisiones de CO<sub>2</sub> como el consumo de energía final vienen expresados en millones de toneladas, de CO<sub>2</sub> equivalente las primeras y de petróleo equivalente el segundo. Para las variables monetarias (PIB y Gasto en I+D) se utilizan medidas en paridad de poder adquisitivo (PPA) en base 2005.

La fuente utilizada para las tres primeras variables (CO<sub>2</sub>, PIB y Consumo de Energía) es la Agencia Internacional de la Energía<sup>11</sup>, en su informe de 2014 "CO<sub>2</sub> Emissions From Fuel Combustion Highlights". Como indicador de la innovación se utiliza el gasto en I+D, cuyas cifras provienen de Eurostat, tanto para la Unión Europea de los 28 como para Estados Unidos y China<sup>12</sup>.

9 A este respecto se puede consultar la web de *United States Environmental Protection Agency* (<https://www3.epa.gov/>). Dada su menor dimensión, su menor ámbito de aplicación y también que algunos de ellos no han empezado a funcionar hasta 2012 (caso de California's Cap and Trade Program), su efecto no es relevante para el ámbito temporal de este trabajo.

10 Ver Li, J.F.; Zhang, Y.X. & Songfeng, C. (2012).

11 IEA en sus siglas en inglés, International Energy Agency.

12 El periodo de estudio viene condicionado por los datos de gasto en I+D, cuya disponibilidad es entre 1996 y 2012 para el caso de la Unión Europea.

**Tabla 1: Emisiones de CO<sub>2</sub>, PIB, Consumo de energía, I+D (1996-2012)**

<b>Emisiones de CO<sub>2</sub></b> (millones de toneladas de CO <sub>2</sub> equivalente)					
	Media	Mediana	Desviación	Máximo	Mínimo
U.E. – 28	3.847,1	3.899,2	168,1	4.008,6	3.504,9
Estados Unidos	5.528,0	5.585,2	213,3	5.773,5	5.074,1
China	5.058,1	4.837,3	1.853,6	8.205,9	3.040,0
<b>PIB</b> (Precios corrientes, expresado en millones de Paridad de Poder Adquisitivo, 2005)					
	Media	Mediana	Desviación	Máximo	Mínimo
U.E. – 28	12.858,3	13.014,4	1.246,0	14.342,8	10.624,2
Estados Unidos	12.372,3	12.670,8	1.399,5	14.231,6	9.704,5
China	6.763,9	5.815,2	3.255,4	12.968,6	2.957,0
<b>Consumo de energía final</b> (Millones de toneladas de petróleo equivalente)					
	Media	Mediana	Desviación	Máximo	Mínimo
U.E. – 28	1.719,9	1.720,7	48,4	1.793,7	1.643,6
Estados Unidos	2.228,3	2.230,7	70,1	2.337,0	2.113,3
China	1.725,3	1.639,9	625,3	2.894,3	1.072,6
<b>Gasto total en I+D</b> (expresado en millones de Paridad de Poder de Compra, 2005)					
	Media	Mediana	Desviación	Máximo	Mínimo
U.E. – 28	189.077,9	183.831,8	42.262,3	257.000,6	12.2059,3
Estados Unidos	261.523,8	257.078,0	53.579,4	347.383,6	16.7407,7
China	66.047,2	48.603,0	54.069,9	186.080,0	9.900,1

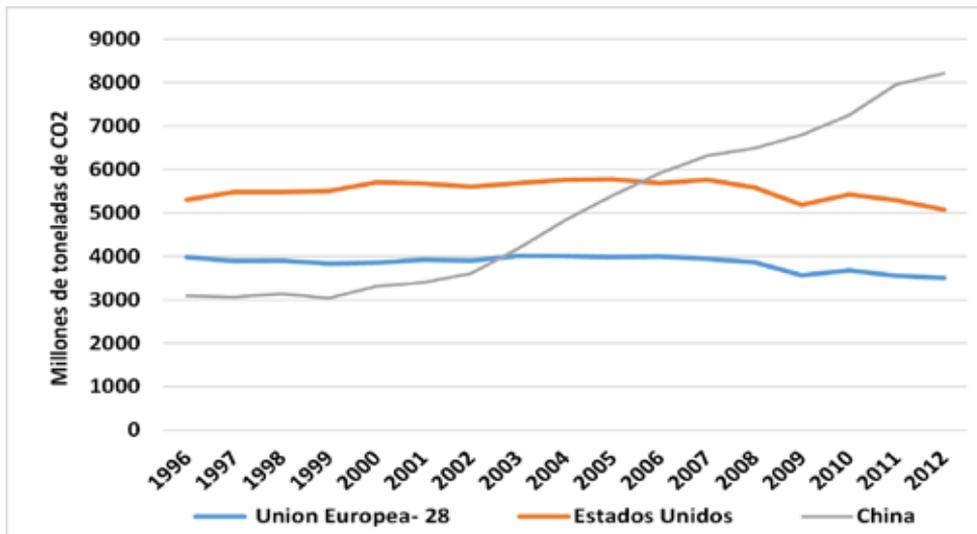
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de IEA (2014) y Eurostat (2015).

En datos absolutos, como muestra la tabla 1, la Unión Europea de los 28 presenta, en media, valores inferiores a Estados Unidos en Emisiones de CO<sub>2</sub>, Consumo de energía e I+D. En cualquiera de estas variables, la UE-28 representa aproximadamente un 70% de los valores que se alcanzan en Estados Unidos. Además, la dispersión de los valores es mayor en este país que en Europa. En lo que respecta a los niveles de riqueza, ambas regiones presentan cifras mucho más similares.

En el caso de China destacan las elevadas cifras de emisiones, frente a las reducidas de PIB y de gasto en I+D. Es necesario señalar también el grado de variabilidad de sus datos, con desviaciones de gran cuantía y grandes diferencias entre los valores máximos y mínimos de todas las variables consideradas.

En el gráfico 1, se representa la evolución de las emisiones de GEI para las tres regiones consideradas. En él queda patente la importancia de China como principal emisor a nivel agregado, mostrando un aumento significativo a partir de 2003 y superando en 2006 las emisiones de Estados Unidos. De hecho, en 2012 las emisiones en China alcanzan cifras similares a las de la Unión Europea y Estados Unidos juntas. Es destacable también el paralelismo en la evolución de las emisiones en la Unión Europea y Estados Unidos, si bien la Unión Europea presenta datos absolutos mucho menores.

**Gráfico 1: Emisiones de GEI (millones de T. de CO<sub>2</sub> equivalente)**



Fuente 1: Elaboración propia a partir de IEA (2014).

Una vez presentados los datos de las emisiones en las regiones consideradas en este estudio, a continuación se presenta la metodología utilizada.

### 3. METODOLOGÍA DE DESCOMPOSICIÓN

Se utiliza una metodología de descomposición factorial que permite relacionar variables económicas, tecnológicas y ambientales. En particular, el punto de

partida de este trabajo es una variación de la identidad de Kaya (1990)<sup>13</sup>, que puede expresarse de la forma siguiente:

$$CO_2 = \frac{CO_2}{Ener} \cdot \frac{Ener}{PIB} \cdot PIB \quad (1)$$

Donde CO<sub>2</sub> son las emisiones totales de GEI; Ener es el consumo de energía total y PIB es la producción real.

La expresión (1) se puede reordenar de la siguiente forma:

$$\frac{CO_2}{PIB} = \frac{CO_2}{Ener} \cdot \frac{Ener}{PIB} \quad (2)$$

Esta identidad pone de manifiesto que la intensidad emisora o emisiones por unidad de PIB ( $\frac{CO_2}{PIB}$ ), se puede explicar por el producto de un factor de carbonización de los consumos energéticos ( $\frac{CO_2}{Ener}$ ) y la intensidad energética ( $\frac{Ener}{PIB}$ ), que recoge el consumo de energía por unidad de producción<sup>14</sup>.

Dado que, como se señaló anteriormente, en las economías actuales la principal fuente de emisiones de GEI procede del sistema energético, debido al uso de combustibles fósiles, el control de las emisiones se ha centrado básicamente en: sustituir la producción y/o consumo de fuentes energéticas contaminantes por otras más respetuosas con el medioambiente, esto es, reducir las emisiones por unidad de energía consumida (modificando el mix energético con más energías limpias y simultáneamente capturando CO<sub>2</sub>)<sup>15</sup>; o bien, conseguir mejorar la eficiencia energética, esto es, reducir la energía consumida por unidad de PIB. La idea que subyace en esta expresión es que, en los efectos que explican la intensidad emisora, puede influir de forma muy significativa la tecnología: mejoras tecnológicas que pueden redundar tanto en ahorros energéticos como en menores emisiones.

13 Aunque la versión inicial de la identidad de Kaya incluye la población ( $CO_2 = \frac{CO_2}{Ener} \cdot \frac{Ener}{PIB} \cdot \frac{PIB}{Pob} \cdot Pob$ ), siguiendo a Alcántara y Padilla (2010) en este trabajo se agrupan los factores afluencia ( $\frac{PIB}{Pob}$ ) y población ( $Pob$ ) en el factor escala del PIB.

14 Esta metodología se utiliza en Fernández et al. (2015a) para estudiar el comportamiento energético y emisor de los mismos países considerados en este trabajo.

15 Alcántara (2009) descompone el factor de carbonización en emisiones por unidad de energía fósil consumida y un factor que expresa el mix-energético. Alcántara y Padilla (2010) para analizar la evolución de las emisiones en el caso de España, descomponen la intensidad energética en el uso de energía primaria en la generación de energía final y en el contenido de carbono de esa energía primaria.

En este trabajo, con la intención de hacer un primer diagnóstico del grado de responsabilidad de la innovación tecnológica en la evolución de las emisiones de CO<sub>2</sub>, se trabaja con una versión modificada de la ecuación (2) expuesta anteriormente. La variable elegida como indicador del nivel agregado de innovación es el gasto en I+D que realiza cada una de las regiones consideradas, y que se considera un posible indicador de la innovación de una sociedad o área geográfica. En concreto se utiliza la siguiente expresión:

$$\frac{CO_2}{PIB} = \frac{CO_2}{Ener} \cdot \frac{Ener}{I + D} \cdot \frac{I + D}{PIB} \quad (3)$$

En esta nueva identidad, y considerando que la innovación destinada a mejorar la intensidad energética es fundamental en la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>, la intensidad energética ( $\frac{Ener}{PIB}$ ) se ha descompuesto en dos factores: ( $\frac{Ener}{I+D}$ ), que denominaremos factor de transformación y que muestra la energía consumida por unidad de innovación. Y, por otro lado ( $\frac{I+D}{PIB}$ ), la innovación por unidad de producción o intensidad innovadora. Sería deseable, en términos medioambientales, que la innovación conduzca a menores emisiones y a menor consumo de energía.

A partir de la expresión (3), la variación de las emisiones de CO<sub>2</sub> por unidad de producción se puede descomponer como la suma de las variaciones interanuales de sus componentes<sup>16</sup>. Es decir:

$$IE \cong FC + FT + II \quad (4)$$

Esta expresión nos indica que la evolución de la intensidad emisora (IE) puede explicarse por la evolución del *factor de carbonización* (FC), y de la intensidad energética, dividida en la suma del *factor de transformación* (FT) y de la *intensidad innovadora* (II). Hay que tener en cuenta que la intensidad innovadora de una economía suele tener valores positivos. Entonces, el “buen” comportamiento, en términos ambientales, del resto de los efectos debe compensar a este último y conducir a la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> por unidad de PIB.

Con la pretensión de conocer si la innovación de las últimas décadas se ha traducido en tecnologías menos contaminantes, a continuación se presentan los resultados obtenidos aplicando la metodología expuesta en este apartado.

16 Un factor de ponderación garantizaría una descomposición aditiva exacta. Sin embargo, en este caso, no se ha considerado necesario utilizarlo por haberse observado diferencias centesimales.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para aplicar la descomposición presentada en la ecuación (4), se han utilizado tasas de variación interanuales medias. Pero, teniendo en cuenta la diferente actitud de las regiones consideradas ante el reto de la disminución de las emisiones contaminantes y que en 2005 comenzó a funcionar el mercado de derechos de emisión en la Unión Europea como instrumento para reducir las emisiones<sup>17</sup>, el análisis se ha realizado para dos subperiodos, (1996-2005) y (2005-2012), con la intención última de apreciar si aparecen diferencias entre las regiones consideradas a partir de ese momento. En la tabla 2 se recogen los resultados. Incluye las variaciones interanuales medias (TVIM) para los dos subperiodos de las variables utilizadas (emisiones de GEI, PIB, Energía final y gasto en I+D) y también de la intensidad emisora (IE), del factor de carbonización (FC), del factor transformación (FT) y de la intensidad innovadora (II).

**Tabla 2: Factores explicativos de la intensidad emisora (TVIM 1996-2005 y 2005-2012)**

1996-2005	CO <sub>2</sub>	PIB	E	I+D	IE (1+2+3)	FC (1)	Intensidad Energética	
							FT (2)	II (3)
U.E. – 28	0,02	2,54	0,55	5,19	-2,46	-0,53	-4,41	2,58
Estados Unidos	0,95	3,39	1,04	5,64	-2,36	-0,09	-4,36	2,18
China	6,40	9,09	5,75	22,02	-2,47	0,5	-13,5	11,0
2005-2012	CO <sub>2</sub>	PIB	E	I+D	IE (1+2+3)	FC (1)	Intensidad Energética	
							FT (2)	II (3)
U.E – 28	-1,83	0,88	-1,19	4,22	-2,68	-0,65	-5,19	3,31
Estados Unidos	-1,83	1,20	-1,14	3,44	-2,99	-0,70	-4,42	2,21
China	6,15	10,4	7,23	17,72	-3,88	-1,00	-8,91	6,60

Fuente: Elaboración propia a partir de IEA (2014) y Eurostat (2015).

<sup>17</sup> En este caso concreto, para alcanzar la reducción en las emisiones firmada en el Protocolo de Kyoto.

Para los dos periodos analizados, las tres regiones presentan reducciones de la Intensidad Emisora (IE), que viene explicada por la evolución negativa del factor de carbonización (FC) y, especialmente, del factor transformación (FT). La excepción es China en el periodo 1996-2005, que presenta un factor de carbonización (FC) con una tasa de variación interanual media de 0,5, lo que evidencia un mix energético poco favorable con el medioambiente.

Teniendo en cuenta la metodología utilizada en este trabajo, de inclusión del gasto en I+D en la intensidad energética, los resultados muestran para los dos periodos una reducción significativa de este índice (Energía /PIB) debido básicamente al factor transformación (FT). Este factor compensa con creces la intensidad innovadora (II), que ha supuesto un aumento de la intensidad emisora (IE) para todas las zonas consideradas, lo que significa que la innovación es poco eficiente en términos productivos para el medio ambiente. Probablemente se deba a que el crecimiento del PIB que implica el gasto en inversión y desarrollo lleva asociado un aumento en emisiones.

Por tanto, la disminución en la intensidad emisora (IE) viene explicada fundamentalmente por la reducción en el factor transformación (FT), que recoge la influencia de la innovación en la intensidad energética, y, en menor medida, por el factor carbonización (FC), que recoge las mejoras en el mix energético.

Hay que señalar la similitud en la evolución de los indicadores para la Unión Europea y Estados Unidos. En China destaca la cuantiosa variación de los factores explicativos, en particular del factor transformación (FT) y de la intensidad innovadora (II), muy superiores al resto.

Considerando la evolución de las variables utilizadas en el análisis (emisiones de GEI, PIB, energía final y gasto en I+D), se pueden observar diferencias significativas entre los dos periodos. Al igual que Roca y Alcántara (2001), consideramos que existe una desvinculación en sentido fuerte entre emisiones y crecimiento económico si las emisiones se reducen a lo largo del tiempo<sup>18</sup>. Y existe una desvinculación en sentido débil cuando disminuye la intensidad emisora debido al aumento de la renta<sup>19</sup>. Lo mismo se argumentaría con el consumo de energía y el crecimiento.

Volviendo al análisis de los resultados, se observa que en el primer periodo (1996-2005), tanto las emisiones de CO<sub>2</sub> como el consumo de energía evidencian una evolución creciente, en particular en China, acompañados de aumentos en el PIB de mayor cuantía, evidenciando un desacoplamiento débil, en la intensidad emisora (IE) y en la intensidad energética. Es necesario señalar, res-

18 Matemáticamente, la desvinculación o desacoplamiento fuerte implica:  $dCO_2/dt < 0$ .

19 La desvinculación o desacoplamiento débil implica:  $d(CO_2/PIB)/dPIB < 0$ .

pecto a la intensidad energética, que existe desacoplamiento débil entre energía y gasto en I+D (disminuye el FT), pero no así en la intensidad innovadora.

Sin embargo, en el segundo periodo entre 2005 y 2012, existe un desacoplamiento fuerte de las emisiones y la energía con el crecimiento del PIB: mientras el PIB crece, las emisiones y el consumo de energía disminuyen para Estados Unidos y la Unión Europea, lo que no sucede en China, donde el desacoplamiento en ambos casos sigue siendo débil.

Por tanto, se puede concluir que la intensidad emisora (CO<sub>2</sub>/PIB) disminuye para las tres regiones en los dos periodos. En todos los casos es debido a reducciones en el factor de carbonización (FC) y en la intensidad energética (FT+II). En concreto, es el factor transformador (FT) el que contrarresta los efectos de la intensidad innovadora (II) sobre la intensidad emisora (IE), experimentando ésta última tasas de variación negativas en ambos periodos.

Sin embargo, es a partir de 2005 cuando se observan disminuciones de las emisiones de CO<sub>2</sub> y en el consumo de energía para la UE y EE.UU., aunque el PIB muestra pequeños crecimientos. En China, sin embargo, tanto las emisiones de CO<sub>2</sub> como el consumo de energía siguen aumentando en el segundo período analizado. Son la evolución del factor de carbonización (FC) y del factor transformador (FT) las que conducen a una disminución de la intensidad emisora (IE), mostrando que su consumo energético es menos emisor.

Merece la pena una reflexión sobre la distinta actitud de Estados Unidos y Europa frente al protocolo de Kioto. A pesar de que Europa se ha erigido en firme defensora del medio ambiente, parece que sus resultados no son mucho mejores que los conseguidos en Estados Unidos. Aunque Estados Unidos no haya ratificado el protocolo, sí ha puesto en marcha numerosas medidas de protección al medio ambiente que, a la luz de los resultados presentados en este trabajo, parece que están siendo eficaces. En relación al CO<sub>2</sub>, desde 2010 la "Agencia para la protección del medio ambiente estadounidense" ([www.epa.gov](http://www.epa.gov)) ofrece datos relativos a las emisiones realizadas por las principales industrias contaminantes con el objetivo de ayudar a la toma de decisiones de política<sup>20</sup>, pero son numerosas las leyes ya en vigor en torno a temas medio ambientales<sup>21</sup>. En el caso de Europa podemos decir que el comercio de derechos de emisión sí ha sido relativamente eficaz para modificar el comporta-

20 "EPA's Greenhouse Gas Reporting Program will help us better understand where greenhouse gas emissions are coming from and will improve our ability to make informed policy, business, and regulatory decisions", tomado de <http://www.epa.gov/ghgreporting/index.html>

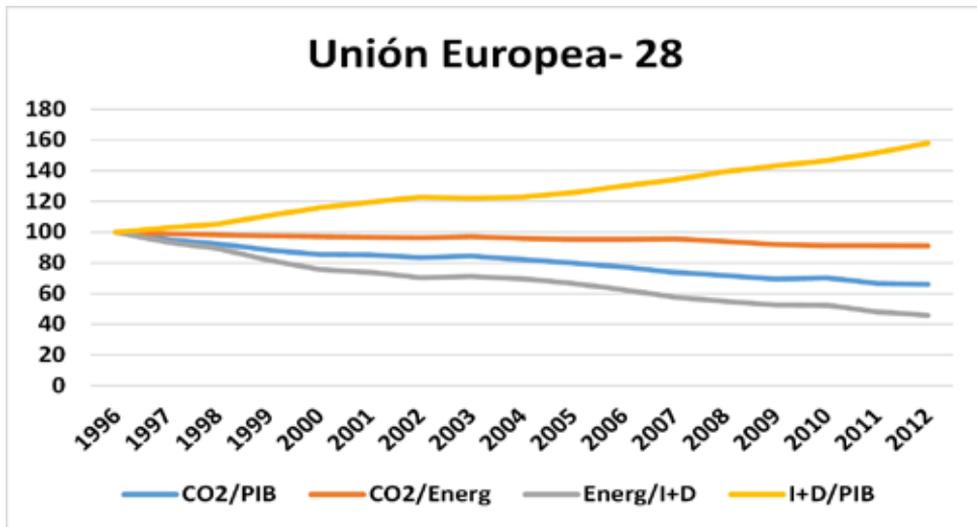
21 Para una revisión, visitar la página citada de la Agencia para la Protección del Medio Ambiente Estadounidense, en su sección de "leyes y regulación", <http://www2.epa.gov/laws-regulations>

miento emisor de los países a pesar de los bajos precios que el carbono ha alcanzado en el mercado (Fernández et al., 2014 y 2015b). Quizás sea debido a que la mera existencia de un mercado y una obligación de comprar derechos generó una expectativa de demanda que llevó a las empresas a iniciar procesos innovadores que redujeran el consumo energético y las emisiones.

En el caso de China, se observan menores aumentos en las emisiones para obtener incrementos mayores en el PIB. Pero esto no se ve acompañado de disminuciones en el consumo de energía, por lo que aún tiene mucho camino que recorrer para conseguir un cambio de tendencia en la protección medioambiental.

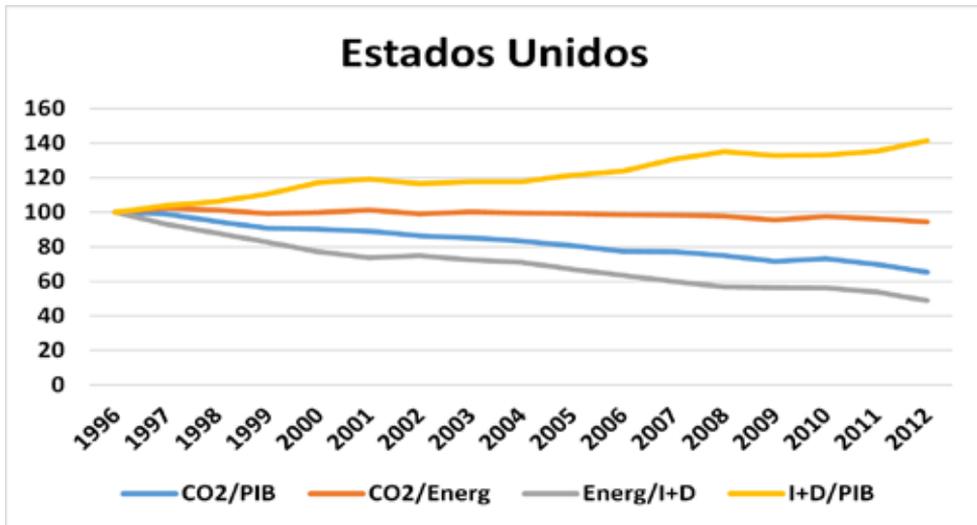
En los gráficos que aparecen a continuación se presentan los índices analizados para las tres regiones consideradas. En ellos se observa que la evolución de la intensidad emisora está claramente determinada por el factor transformador. Este resultado, en el caso de Europa, contrasta con el obtenido por otros autores (Mielnik y Goldemberg, 1999) cuyo resultado ponía de manifiesto que el factor explicativo que en mayor medida justificaba la evolución de la intensidad emisora era el índice de carbonización.

**Gráfico 2: Intensidad emisora, factor de carbonización, factor transformador, intensidad innovadora para Europa de los 28 (1996=base 100)**



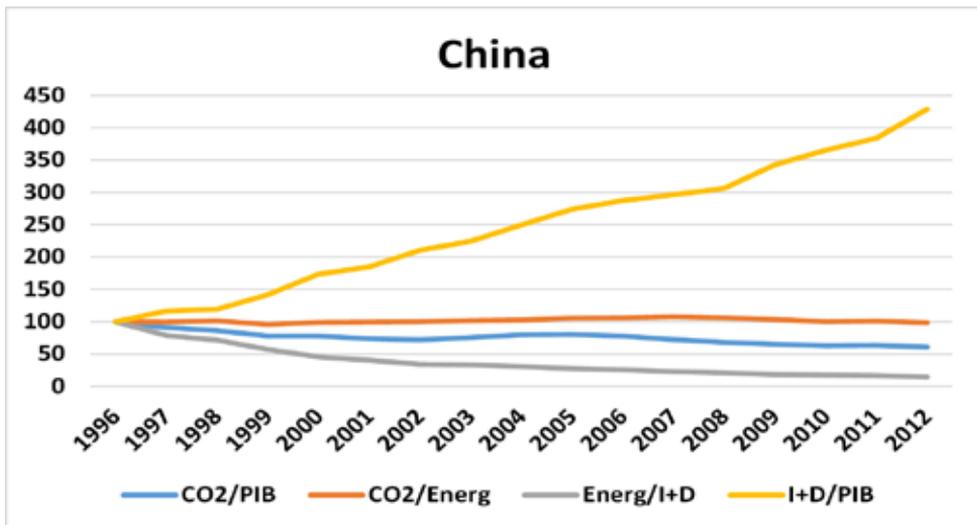
Fuente 2: Elaboración propia a partir de IEA (2014) y Eurostat (2015).

**Gráfico 3: Intensidad emisora, factor de carbonización, factor transformador, intensidad innovadora para Estados Unidos (1996=base 100)**



Fuente 3: Elaboración propia a partir de IEA (2014) y Eurostat (2015).

**Gráfico 4: Intensidad emisora, factor de carbonización, factor transformador, intensidad innovadora para China (1996=base 100)**



Fuente 4: Elaboración propia a partir de IEA (2014) y Eurostat (2015).

Como ya se ha avanzado, la evolución de la intensidad emisora, en las tres regiones consideradas, está condicionada por el factor transformación, que pone de manifiesto la relevancia de una innovación que redunde en un cambio profundo de la economía desde tres vertientes:

- Tecnologías más eficientes desde el punto de vista productivo, que necesiten menores consumos de energía para obtener una unidad de producto.
- Tecnologías más eficientes desde el punto de vista medioambiental, de forma que cada unidad de energía consumida emita menos CO<sub>2</sub> a la atmósfera.
- Un cambio en el mix energético, es decir, que utilicen fuentes menos contaminantes.

En este sentido, conviene recordar que uno de los inconvenientes que plantea la identidad de Kaya es que los principales factores pueden no ser independientes el uno del otro, de forma que, por ejemplo, países con mayor crecimiento económico podrían desarrollar tecnologías más eficientes gracias a la mayor rentabilidad del capital (Duró y Padilla, 2005). Sin embargo, este trabajo ha permitido observar la relevancia de la innovación y el cambio tecnológico que conlleva, poniendo de manifiesto la importancia de continuar investigado con herramientas metodológicas diferentes.

## 5. CONCLUSIONES

La consecución de un desarrollo sostenible se ha convertido en un objetivo prioritario para las economías actuales. En este contexto, tanto la sustitución de fuentes energéticas contaminantes por otras menos nocivas, como la reducción del consumo energético se han convertido en objetivos fundamentales, en los que la innovación adquiere un papel fundamental.

Este trabajo tiene el objetivo de profundizar en los factores explicativos de la evolución de las emisiones de CO<sub>2</sub>, y buscar factores que tengan efectos reductores sobre las mismas con el ánimo de poder hacer recomendaciones en el ámbito de la política económica y medioambiental. El análisis se centra en la Unión Europea, Estados Unidos y China entre 1996 y 2012. Teniendo en cuenta que en 2005 se puso en marcha el Comercio de Derechos de Emisión en la UE, se han considerado dos subperíodos 1996-2005 y 2005-2012. La intención es evidenciar si este hecho se ha reflejado en una evolución de la intensidad emisora en la UE diferente de la seguida por EE.UU y China.

La novedad de este trabajo reside en que incluye una nueva variable explicativa en la descomposición factorial de las emisiones de CO<sub>2</sub>, a saber, el gasto

en I+D de las economías analizadas. De hecho, esta variable se ha utilizado de forma agregada para cada una de las regiones consideradas para, por una parte, mantener la coherencia con el resto de variables, todas ellas agregadas, y por otra, tener en cuenta tanto los efectos directos como los efectos indirectos y el “efecto rebote” que pueda generar sobre las emisiones de CO<sub>2</sub>.

Considerando que la innovación destinada a mejorar la intensidad energética es fundamental en la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>, se ha descompuesto la intensidad energética en dos nuevos factores denominados factor transformación (energía consumida por unidad de gasto en I+D) e intensidad innovadora (gasto en I+D por unidad de producción). La descomposición utilizada no nos dice por qué las economías tienen diferentes niveles de PIB o de gasto en I+D, pero sí nos indica que éstas son cuestiones relevantes en la explicación de la evolución de las emisiones de CO<sub>2</sub>.

En concreto, en este trabajo se ha constatado que, de forma general, la cuantía y signo de la intensidad emisora está condicionada significativamente por el factor transformación, por encima incluso del factor de carbonización. Esto revela la importancia que la innovación tiene, no sólo en el ahorro energético, sino también en las menores emisiones por unidad de PIB. Por tanto, se pone de manifiesto que la tecnología destinada a la consecución de mejoras en la eficiencia energética es fundamental en la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>.

Es a partir de 2005 cuando se observan diferencias en la evolución de las variables consideradas en la determinación de los factores explicativos. Mientras que China mantiene importantes crecimientos en las emisiones de CO<sub>2</sub>, la Unión Europea y Estados Unidos las reducen. En estas dos regiones aumenta la cuantía de la variación en el factor transformación, entendido como el consumo de energía asociado a cada nivel de gasto en I+D, y la causa es la reducción en el consumo de energía. En contraposición, en China no sólo aumentan las emisiones, sino también el consumo de energía, con variaciones en el factor transformador de menor cuantía en el segundo periodo.

Este resultado pone de manifiesto que si la innovación conlleva ahorros energéticos, redundará en menos emisiones. Lo que no se ha conseguido aún es que la intensidad innovadora favorezca la reducción de la intensidad emisora. Poner en marcha políticas económicas que redunden en este objetivo es fundamental para el medioambiente.

También hay que destacar que el esfuerzo de la mayor parte de los países ha estado sesgado hacia la promoción de fuentes renovables, consiguiendo que el efecto carbonización contribuya positivamente a la reducción de las emisiones. Sin embargo, como los resultados evidencian, es el efecto transformación el que en mayor medida logra reducir las emisiones. Parece, por tanto, que los

recursos deberían destinarse a la promoción directa de la innovación para conseguir una producción energéticamente eficiente.

La similitud en la evolución de todos los indicadores en EE.UU. y la UE muestra que el comportamiento no lo modifican acuerdos voluntarios, sino la voluntad de modificar la realidad, en este caso, la preocupación por el medio ambiente y el cambio climático. A pesar de que EEUU no firmó el protocolo de Kioto, sí ha puesto en marcha medidas que, a la luz de los resultados del análisis, parecen haber logrado efectos similares sobre las variables analizadas a los conseguidos por la Unión Europea con, entre otras medidas, su comercio de derechos de emisión EU-ETS.

Como consecuencia, y en lo que a China se refiere, los esfuerzos deben ir encaminados a involucrarla en la preservación del medioambiente desde una perspectiva más abierta, de forma que sea ella la que elija las herramientas económicas y políticas para realizarlo. En este sentido, en los últimos años se está poniendo de manifiesto la preferencia de las economías por la flexibilidad de las medidas de mercado como impulsoras de la reducción de las emisiones a través de la innovación y el cambio tecnológico.

En definitiva, el análisis realizado muestra que, independientemente de la forma de enfrentarse a la reducción de emisiones contaminantes, ahora puede recomendarse el gasto en I+D, no sólo como motor del crecimiento económico de cualquier economía, sino como impulsor del desarrollo sostenible, donde el crecimiento pueda compaginarse con menos emisiones de CO<sub>2</sub> a lo largo del tiempo.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alcántara, V. (2009): "Evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero en España. Situación actual y factores explicativos", *Papeles de Economía Española*, 121, 88-98.

Alcántara, V. y Padilla, E. (2010): "Determinantes del crecimiento de las emisiones de gases de efecto invernadero en España (1990-2007)", *Revista Galega de Economía*, 19(1), 1-15.

Ang, B. W. (1999): "Is the energy intensity a less useful indicator than the carbon factor in the study of climate change?", *Energy Policy*, 27, 943-946.

Balsalobre, D.; Álvarez-Herránz, A.; Baños, J. (2016): "La innovación y la sustitución energética como medidas de corrección medioambiental en países de la OCDE", *Estudios de Economía Aplicada*, 34-1, 235-260.

Common, M. y Stagl, S. (2008): *Introducción a la Economía Ecológica*, Reverté, Barcelona.

- Cantos, J. M. y Balsalobre, D. (2013): "Incidencia del gasto público en I+D+i energético sobre la corrección medioambiental en España". *Estudios de Economía Aplicada*, 31-1, 93-126.
- De Bruyn, S. M. y Heintz, R. J. (1999): "The environmental Kuznets curve hipotesis", en Van Den Bergh, J. ed., *Handbook of Environmental and Resource Economics*. Edward Edgar, Cheltenham, 656-677.
- Díaz-Vázquez, M. R. (2009): "The dissociation between emissions and economic growth: The role of shocks exogenous to the environmental Kuznets curve model", *Applied Econometrics and International Development*, 9 (2), 31-42.
- Duró, J. A. y Padilla, E. (2005): "Análisis de los factores determinantes de las desigualdades internacionales en las emisiones de CO<sub>2</sub> per cápita aplicando el enfoque distributivo: una metodología de descomposición por factores de Kaya", *Papeles de Trabajo del Instituto de Estudios Fiscales*, 25.
- Ekins, P. (1997): "The Kuznets curve for the environment and economic growth: examining the evidence", *Environment and Planning A*, 29 (5), 805-830.
- Eurostat (2015): Base de datos de Eurostat, (última consulta: 23-febrero-2015). <http://ec.europa.eu/eurostat/data/database>
- Fernández, Y., Fernández, M.A., González, D. y Olmedillas, B. (2014): "El factor regulación como determinante del consumo energético y de las emisiones de CO<sub>2</sub>", *Cuadernos de Economía*, 37 (104), 102-111.
- Fernández, Y., Fernández, M.A. y Olmedillas, B. (2015a): Comportamiento energético y emisor: variables clave para un modelo económico sostenible, *Estudios Estratégicos de Energía y Sostenibilidad*, Universidad laica Eloy Alfaro de Manabí y Universidad Juárez del Estado de Durango, 2015, pp. 47-66.
- Fernández, Y., Fernández, M.A., González, D. y Olmedillas, B. (2015b): "El efecto regulador de los Planes Nacionales de Asignación sobre las emisiones de CO<sub>2</sub>", *Revista de Economía Mundial*, 40, pp. 45-63.
- Fisher-Vanden, K.; Jefferson, G.H.; Liu, H.; y Tao, Q. (2004): "What is driving China's decline in energy intensity? *Resource and Energy Economics*, 26, 77-97.
- Garrone, P. y L. Grilli (2010): "Is there a relationship between public expenditure in energy R&D and carbon emissions per GDP? An empirical investigation", *Energy Policy*, vol. 38 (10), pp. 5600-5613.
- International Energy Agency, IEA (2014): CO<sub>2</sub> Emissions From Fuel Combustion Highlights, (última consulta: 23-febrero-2015) <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/co2-emissions-from-fuel-combustion-highlights-2014.html>
- International Energy Agency, IEA (2015): CO<sub>2</sub> Emissions From Fuel

- Combustion Highlights (última consulta: 05-septiembre-2016). <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/CO2EmissionsFromFuelCombustionHighlights2015.pdf>
- IPCC (2013): Resumen para responsables de políticas. En: Cambio Climático 2013: Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.
- IPCC (2014a): Cambio climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad – Resumen para responsables de políticas. Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea y L.L. White (eds.)]. Organización Meteorológica Mundial, Ginebra, Suiza, 34 págs. (en árabe, chino, español, francés, inglés y ruso).
- IPCC, (2014b): Resumen para responsables de políticas. En: Cambio climático 2014: Mitigación del cambio climático. Contribución del Grupo de trabajo III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.
- Kaya, Y. (1990): "Impact of Carbon Dioxide Emission Control on GNP Growth: Interpretation of Proposed Scenarios", *Paper presented to the IPCC Energy and Industry Subgroup*, Response Strategies Working Group, Paris.
- King, D. (2004): "Climate change science: adapt, mitigate, or ignore?" *Science*, 303 (5655): 176-177.
- Levinson, A. (2009): "Technology, international trade, and pollution from US manufacturing", *American Economic Review*, 99(5): 2177-2192.
- Li, J.F.; Zhang, Y.X. & Songfeng, C. (2012): "Establishing an Emissions trading System in China under the Twelfth five-Year Plan Policy Considerations", *Policy Briefs*, nº 2, Institute for Sustainable Development and International Relations (IDDRI), Paris.
- Linares Llamas, P. (2009): "Eficiencia energética y medio ambiente", *Información Comercial Española*, nº 847, 75-92.
- Mielnik, O. y Goldemberg, J. (1999): "The Evolution of the Carbonization Index in

- Developing Countries”, *Energy Policy*, 27, 307-308.
- Roca, J. y Alcántara, V. (2001): “Energy intensity, CO<sub>2</sub> emissions and the environmental Kuznets curve. The Spanish case”, *Energy Policy*, 29, 553-556.
- Roca, J.; Padilla, E.; Farré, M.; Galletto, V. (2001): “Economic Growth and Atmospheric Pollution in Spain: Discussing the Environmental Kuznets curve Hypothesis”, *Ecological Economics*, 39, 85-99.
- Roca, J. (2002): “The IPAT Formula and its Limitations”, *Ecological Economics*, 42(1), 1-2.
- Roca, J. y Padilla, E. (2003): “Emisiones atmosféricas y crecimiento económico en España. La curva de Kuznets ambiental y el protocolo de Kyoto”, *Economía Industrial*, 351, 73-86.
- Ruiz, M. (2010): “Análisis del impacto de la I+D pública sobre la intensidad energética en la UE-15”, *Clim. Economía*, 16, 381-399.
- Stern, D. I. y Common, M. S. (2001): “Is There an Environmental Kuznets Curve for Silfur?” *Journal of Environmental Economics and Management*, 41, 162-168.
- Sun, J.W. (1999): “The Nature of CO<sub>2</sub> Emissions Kuznets Curve”, *Energy Policy*, 27, 691-694.
- Tarancón, M.A. y Del Río, P. (2004): “Cambio tecnológico y emisiones de CO<sub>2</sub>: Análisis input-output y análisis de sensibilidad mediante programación lineal”, *Estudios Económicos de Desarrollo Internacional*, AEEADE, 4/1, 41-68.
- UNFCCC (2015): Convención Marco sobre el cambio climático, 1/CP.17. Aprobación del acuerdo de París. (última consulta: 30-abril-2016).  
<http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/spa/l09s.pdf>
- US Environmental Protection Agency (2015): Greenhouse Gas Reporting Program (última consulta: 28-abril-2015) <http://www3.epa.gov/>