

A dynamic approach to measuring ecological-economic performance with directional distance functions: greenhouse gas emissions in the European Union

Una aproximación dinámica a la medición del comportamiento ecológico-económico con funciones distancia direccionales: emisión de gases de efecto invernadero en la Unión Europea

Andrés J. Picazo-Tadeo (andres.j.picazo@uv.es)

Juana Castillo (juana.castillo@uv.es)

Mercedes Beltrán-Esteve (mercedes.beltran@uv.es)

Departamento de Economía Aplicada II. Universidad de Valencia.
Campus de Tarongers. 46022, Valencia. España. Telf. ++34 963 828 349

ABSTRACT. The impact of economic activity on the environment is a matter of growing concern for firm managers, policymakers, researchers and society as a whole. Building on previous work by Kortelainen [Kortelainen, M., 2008. Dynamic environmental performance analysis: A Malmquist index approach. *Ecological Economics* 64, 701-715], we contribute an approach to assessing *dynamic ecological-economic performance*, or simply *dynamic eco-performance*, and its two determinants, *ecological-economic efficiency change* and *technical change*, at specific-environmental-pressure level. In doing so, we use *Data Envelopment Analysis* techniques, directional distance functions and *Luenberger* indices. Our approach is employed to assess dynamic eco-performance in the emission of greenhouse gases in the European Union-27 over the period 1990-2010. The main result is that eco-performance has been boosted by technical change rather than by increases in eco-efficiency. Accordingly, policy measures aimed at enhancing eco-efficiency are recommended to improve eco-performance in European countries regarding greenhouse gas emissions.

KEYWORDS: Dynamic eco-performance; directional distance functions; Data Envelopment Analysis; greenhouse gases emissions; European Union.

JEL CLASSIFICATION: C61; O44; Q01; Q54.

RESUMEN. El impacto de la actividad económica sobre el medioambiente es un tema de creciente preocupación para empresas, políticos, investigadores y la sociedad en su conjunto. Basándose en el trabajo previo de Kortelainen [Kortelainen, M., 2008. Dynamic environmental performance analysis: A Malmquist index approach. *Ecological Economics* 64, 701-715], este trabajo aporta una aproximación metodológica para valorar el *comportamiento dinámico ecológico-económico*, o simplemente *eco-comportamiento dinámico*, y sus dos determinantes, *cambio en la eficiencia económico-ecológica* y *cambio técnico*, a nivel de presiones medioambientales específicas. Con este propósito, se utilizan técnicas de *Análisis Envolvente de Datos*, funciones distancia direccionales e índices *Luenberger*. Esta aproximación se emplea para valorar el eco-comportamiento dinámico en las emisiones de gases de efecto invernadero de los países de la Unión Europea-27 durante el período 1990-2010. El principal resultado es que la mejora en el eco-comportamiento ha sido impulsada por el cambio técnico más que por los aumentos de eco-eficiencia. En consecuencia, se recomienda la puesta en práctica de medidas de política medioambiental orientadas a mejorar la eco-eficiencia de los países europeos en sus emisiones de gases de efecto invernadero.

PALABRAS CLAVE: Eco-comportamiento dinámico; funciones distancia direccionales; Análisis Envolvente de Datos; emisiones de gases de efecto invernadero; Unión Europea.

CLASIFICACIÓN JEL: C61; O44; Q01; Q54.

Una aproximación dinámica a la medición del comportamiento ecológico-económico con funciones distancia direccionales: emisión de gases de efecto invernadero en la Unión Europea

1. Introducción

La visión tradicional del crecimiento económico centrada exclusivamente en el aumento de la cantidad de bienes y servicios disponibles para satisfacer las necesidades humanas, ha dado paso en las últimas décadas a un concepto de crecimiento basado en el *desarrollo sostenible*, entendido como *'development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs'* (WCED 1987:43). La sostenibilidad es intrínsecamente un concepto con múltiples facetas que incluye, al menos, dos dimensiones estrechamente relacionadas entre sí, la dimensión económica y la medioambiental. El medioambiente contribuye al proceso de obtención de bienes y servicios, y éste, a su vez, está directamente afectado por la actividad económica. Los procesos de producción influyen en la calidad del medio ambiente tanto por el uso que hacen de recursos naturales como por los residuos que generan. Igualmente, la disponibilidad de recursos naturales y las restricciones a las emisiones impuestas por las regulaciones medioambientales afectan a aspectos económicos fundamentales, tales como los beneficios empresariales.

La literatura en el área de la economía ecológica ha reconocido desde hace tiempo la necesidad de desarrollar herramientas para evaluar el impacto de la actividad productiva sobre el medioambiente, como condición necesaria para que las políticas medioambientales encaminadas a lograr un desarrollo sostenible sean eficaces (Huppel y Ishikawa 2005a; 2009). En este contexto, se han desarrollado distintas aproximaciones metodológicas para obtener indicadores de la contribución de los productos o empresas a la sostenibilidad, entre ellas, las conocidas como *Life Cycle Accounting* y *Life Cost Cycle*. Sin embargo, una de las desventajas de estas aproximaciones es que proporcionan indicadores difíciles de agregar. Aspectos como la ponderación de las presiones medioambientales en la construcción de un indicador de comportamiento ecológico agregado, o cómo combinar los comportamientos ecológico y económico, son problemas relevantes y, al mismo tiempo, difíciles de resolver puesto que las presiones sobre el medioambiente no tienen precios de mercado.

Una alternativa al uso de valores monetarios para resolver los problemas de agregación de las presiones ambientales, es la utilización de técnicas de *Análisis Envolvente de Datos* (DEA) para calcular medidas de comportamiento relativo basadas en el concepto de *eficiencia ecológica-económica*, o simplemente *eco-eficiencia*. Según la OCDE (1998:7), *'Eco-efficiency expresses the effi-*

ciency with which ecological resources are used to meet human needs (...) and can also be defined as a ratio of output and input so that the output represents the value of the products or services that a company produces and the input is the sum of environmental pressures caused by the production'. El concepto eco-eficiencia representa la relación entre el valor económico generado por una unidad de producción (empresa, industria o economía) y una medida agregada de la presión ejercida sobre el medioambiente (Schaltegger y Synnestvedt, 2002). Además, varios organismos internacionales han reconocido que la evaluación de la eco-eficiencia es un poderoso instrumento, capaz de proporcionar a los gerentes y políticos información útil para mejorar el diseño de sus estrategias de gestión empresarial y políticas medioambientales (Naciones Unidas 2009).

En esta línea de investigación, Kuosmanen y Kortelainen (2005) desarrollaron un marco general para calcular medidas de *eco-eficiencia relativa* utilizando DEA en un entorno estático. Kortelainen (2008) extendió estas técnicas a un entorno dinámico; con ese propósito utilizó índices de *Malmquist* (Malmquist 1953) para desarrollar una medida proporcional de lo que denominó *comportamiento ambiental dinámico*, resultante de la combinación del *cambio en la eco-eficiencia relativa* y del *cambio técnico medioambiental*. En nuestro artículo, extendemos el enfoque de Kortelainen (2008) para evaluar el eco-comportamiento dinámico y sus determinantes a nivel de presión ambiental específica. Para ello, utilizamos índices de *Luenberger* (Chambers et al. 1996), funciones distancia direccionales y técnicas DEA. En concreto, se utiliza el enfoque DEA para la medición de la eco-eficiencia propuesto por Picazo-Tadeo et al. (2012), que permite evaluar la eco-eficiencia en diferentes escenarios que representan las preferencias de los investigadores y/o políticos respecto a los comportamientos económico y ecológico.

Esta aproximación metodológica se aplica a la valoración del eco-comportamiento dinámico en la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) de la Unión Europea-27 (UE-27) durante el período 1990-2010. El calentamiento global y el cambio climático se han convertido en asuntos de creciente preocupación para los responsables políticos, los investigadores y la sociedad en su conjunto en las últimas décadas; de hecho, las políticas de lucha contra el cambio climático son uno de los pilares de la política medioambiental en los países desarrollados. Además, los investigadores parecen estar de acuerdo en que estos cambios están causados, de forma inequívoca, por las crecientes concentraciones de gases de efecto invernadero originados por la actividad humana, principalmente en la producción y uso de energía. En consecuencia, nuestra evaluación del eco-comportamiento dinámico podría proporcionar a los legisladores europeos información de utilidad para mejorar el diseño de las políticas medioambientales en la lucha contra el cambio climático.

En cuanto a la organización del artículo, después de esta introducción el apartado 2 desarrolla la metodología y el apartado 3 describe los datos y la aplicación empírica. En el apartado 4 se presentan los resultados y se destacan algunas recomendaciones de política; por último el apartado 5 incluye las conclusiones y sugiere algunas vías de investigación futura.

2. Metodología

2.1. Eco-comportamiento, eco-eficiencia y cambio técnico

Supongamos que observamos un conjunto de $k=1, \dots, K$ unidades de toma de decisiones (DMUs) durante un periodo $t=1, \dots, T$. En cada año t de este periodo, la actividad económica de estas unidades genera un resultado económico medido por el valor añadido v^t , junto a una serie de $n=1, \dots, N$ presiones medioambientales representadas por el vector $\mathbf{p}^t = (p_1^t, \dots, p_n^t)$.¹

El *conjunto tecnológico generador de presiones* (PGTS) representa todas las combinaciones posibles de valor añadido y presiones medioambientales y, en el periodo t , se define como (Kuosmanen and Kortelainen 2005; ver también Picazo-Tadeo et al. 2011):

$$\text{PGTS}^t = \left[(\mathbf{v}^t, \mathbf{p}^t) \in \mathbb{R}_+^{N+1} \mid \text{el valor añadido } v^t \text{ puede ser obtenido con las presiones } \mathbf{p}^t \right] \quad (1)$$

La tecnología también puede representarse por el *conjunto de requerimientos de presiones* (PRS) que, tal como se define en Beltrán-Estève et al. (2013), representa todas las combinaciones de presiones medioambientales \mathbf{p} que permiten obtener, al menos, el valor añadido v . Formalmente, para el periodo t este conjunto es:

$$\text{PRS}^t(v^t) = \left[\mathbf{p}^t \mid (\mathbf{v}^t, \mathbf{p}^t) \in \text{PGTS}^t \right] \quad (2)$$

Suponemos que la tecnología cumple las siguientes propiedades (Picazo-Tadeo et al., 2012): a) la actividad económica ejerce, inevitablemente, algunas presiones sobre el medioambiente, de modo que la única forma de no provocar presiones es no producir; b) es posible obtener un menor valor añadido ejerciendo la misma cantidad de presiones medioambientales; c) puede aumentarse la cantidad de presiones ejercidas para obtener un determinado valor añadido; y, por último, d) cualquier combinación convexa de dos o más pares factibles (observados) de valor añadido y presiones medioambientales es también factible. En esta caracterización de la tecnología, al igual que en los trabajos previos de Korhonen y Luptacik (2004), Kuosmanen y

¹ Los vectores están en negrita para distinguirlos de los escalares.

Kortelainen (2005) y Zhang et al. (2008), las presiones medioambientales se tratan formalmente como inputs convencionales.²

El *comportamiento ecológico-económico*, o simplemente *eco-comportamiento*, puede definirse como la ratio entre el valor añadido y un indicador compuesto de presión medioambiental resultado de la agregación de las presiones medioambientales individuales (Kortelainen 2008). El *eco-comportamiento* mejora cuando el valor añadido aumenta con respecto a la presión medioambiental agregada y, para el periodo t , se formula como:

$$\text{Eco-comportamiento}^t = \frac{\text{Valor añadido}^t}{\text{Presión medioambiental agregada}^t} = \frac{v^t}{w_1 p_1^t + w_2 p_2^t + \dots + w_n p_n^t} \quad (3)$$

En el cálculo de la presión medioambiental agregada utilizamos como función de agregación una media ponderada lineal de las distintas presiones individuales, donde w_n es la ponderación asignada a la presión n . Ésta es, además, la aproximación más común en la literatura.³

Es importante destacar que la interpretación que hacemos en este trabajo de la ratio entre el valor añadido y la presión medioambiental agregada es algo distinta a la realizada por Kuosmanen and Kortelainen (2005), que utilizan esta ratio como una medida de la *eficiencia ecológica-económica relativa*. La razón es que, dado el propósito de nuestro trabajo, queremos separar inequívocamente el concepto de eco-eficiencia, que conlleva una valoración relativa del comportamiento respecto a una referencia que representa las mejores prácticas, del concepto de eco-comportamiento, que no implica tal comparación. Otros trabajos se han referido a esta ratio como *productividad medioambiental* (Huppel and Ishikawa 2005b).

Siguiendo con los distintos conceptos metodológicos utilizados en este trabajo, la *función de distancia direccional* (Färe and Grosskopf 2000)⁴ puede definirse en el periodo t como:

$$\bar{D}^t [v^t, \mathbf{p}^t; \mathbf{g} = (g_v, -\mathbf{g}_p)] = \text{Sup} \left[\beta \mid (\mathbf{p}^t - \beta \mathbf{g}_p) \in \text{PRS}^t(v^t + \beta g_v) \right], \quad (4)$$

siendo $\mathbf{g} = (g_v, -\mathbf{g}_p)$ el denominado *vector dirección*.

² Dyckhoff and Allen (2001) consideran distintas aproximaciones para analizar, en el contexto de modelos DEA, las externalidades no deseables de los procesos de producción.

³ Zhou et al. (2006) comparan diversos métodos de agregación para la construcción de indicadores medioambientales compuestos.

⁴ Picazo-Tadeo et al. (2005) ponen de relieve la utilidad de estas funciones para el análisis medioambiental.

La función distancia direccional proporciona una completa representación del PGTS y es igual o mayor que cero (Chambers et al. 1998 definen las propiedades de esta función). Además, esta función es una herramienta flexible para medir la eco-eficiencia, ya que permite valorar los aumentos potenciales en el valor añadido y/o las reducciones en las presiones medioambientales a lo largo de un determinado vector dirección definido por el investigador. Este vector puede representar las preferencias de los responsables políticos, los directivos de las empresas o la sociedad en su conjunto, respecto al *trade-off* entre el comportamiento económico y ecológico.

Una vez definidos los conceptos de eco-comportamiento y función distancia direccional, siguiendo a Kortelainen (2008), en este trabajo proponemos un indicador basado en el cálculo de índices *Luenberger* (Chambers et al. 1996) para valorar la dinámica del comportamiento ecológico-económico y sus determinantes. Para evaluar el cambio en el eco-comportamiento de una DMU entre dos periodos adyacentes 0 y 1, primero tomamos como referencia la tecnología del periodo 0 y valoramos el cambio en el eco-comportamiento por la diferencia entre las funciones distancia direccionales de las observaciones 0 y 1 respecto a dicha tecnología. Formalmente:

$$\begin{aligned} \text{Cambio en eco-comportamiento}^0 = \text{EPCh}^0 = & \left[\bar{D}^0(v^0, p^0; g = (g_v, -g_p)) \right. \\ & \left. - \bar{D}^0(v^1, p^1; g = (g_v, -g_p)) \right] \end{aligned} \quad (5)$$

Alternativamente, el cambio en el eco-comportamiento puede medirse utilizando como referencia la tecnología del periodo 1:

$$\begin{aligned} \text{Cambio en eco-comportamiento}^1 = \text{EPCh}^1 = & \left[\bar{D}^1(v^0, p^0; g = (g_v, -g_p)) \right. \\ & \left. - \bar{D}^1(v^1, p^1; g = (g_v, -g_p)) \right] \end{aligned} \quad (6)$$

Siguiendo a Chambers et al. (1996), el indicador *Luenberger de cambio en eco-comportamiento* que valora el cambio en el comportamiento económico-ecológico entre los periodos 0 y 1, se calcula como la media aritmética de los índices de cambio definidos en las expresiones (5) y (6):⁵

$$\begin{aligned} \text{LEPCh}^{0,1} [v^0, p^0, v^1, p^1; g = (g_v, -g_p)] = & \frac{1}{2} \left[\left\langle \bar{D}^0(v^0, p^0; g = (g_v, -g_p)) - \bar{D}^0(v^1, p^1; g = (g_v, -g_p)) \right\rangle \right. \\ & \left. + \left\langle \bar{D}^1(v^0, p^0; g = (g_v, -g_p)) - \bar{D}^1(v^1, p^1; g = (g_v, -g_p)) \right\rangle \right] \end{aligned} \quad (7)$$

⁵ Un valor positivo de este indicador apunta a una mejora en el eco-comportamiento mientras que valores negativos indican que el desempeño económico-ecológico ha empeorado.

En línea con la descomposición del índice de productividad de *Malmquist* (Färe et al. 1994) que utiliza Kortelainen (2008)⁶, en este trabajo descomponemos el indicador *Luenberger* de cambio en el eco-comportamiento en dos elementos mutuamente excluyentes que representan, respectivamente, el cambio en la eco-eficiencia y el cambio técnico.

Como ya se ha comentado, la flexibilidad es una de las principales ventajas de las funciones distancia direccionales, ya que permiten valorar el eco-comportamiento en diferentes direcciones que representan las preferencias de los investigadores o de los responsables de la política medioambiental. Así, vamos a suponer que nuestro interés es valorar en qué medida se pueden reducir proporcionalmente todas las presiones sin disminuir el valor añadido. La función distancia direccional que evalúa dicha reducción radial proporciona una medida de la eco-eficiencia y, en el periodo t , se calcula como:

$$\text{Eco-eficiencia}^t = \text{EEff}^t = \bar{D}^t[v^t, \mathbf{p}^t; \mathbf{g} = (0, -\mathbf{p}^t)] = \text{Sup} \left[\beta \mid ((1-\beta)\mathbf{p}^t) \in \text{PRS}^t(v^t) \right] \quad (8)$$

donde $\mathbf{g} = (0, -\mathbf{p}^t)$ es el vector dirección que representa las preferencias indicadas.

Además, en este escenario, el cambio en la eco-eficiencia entre los periodos 0 y 1 puede valorarse como la diferencia entre las funciones distancia direccionales de las observaciones 0 y 1 en relación a sus respectivas tecnologías contemporáneas:

$$\text{EEffCh}^{0,1}[v^0, \mathbf{p}^0, v^1, \mathbf{p}^1; \mathbf{g} = (0, -\mathbf{p})] = \left[\bar{D}^0(v^0, \mathbf{p}^0; \mathbf{g} = (0, -\mathbf{p}^0)) - \bar{D}^1(v^1, \mathbf{p}^1; \mathbf{g} = (0, -\mathbf{p}^1)) \right] \quad (9)$$

En consecuencia, este indicador mide el aumento/disminución de las presiones medioambientales que resulta de los cambios en la eco-eficiencia entre los períodos 0 y 1.

Por otro lado, el cambio técnico en el escenario de reducción proporcional de todas las presiones medioambientales puede valorarse comparando la distancia de la observación en 0 respecto a la tecnología de los periodos 0 y 1, respectivamente. En términos formales:

$$\text{TechCh}^{0,1}[v^0, \mathbf{p}^0, v^1, \mathbf{p}^1; \mathbf{g} = (0, -\mathbf{p}^0)] = \left[\bar{D}^1(v^0, \mathbf{p}^0; \mathbf{g} = (0, -\mathbf{p}^0)) - \bar{D}^0(v^0, \mathbf{p}^0; \mathbf{g} = (0, -\mathbf{p}^0)) \right] \quad (10)$$

o, alternativamente, utilizando la observación del periodo 1 como base de la comparación:

$$\text{TechCh}^{0,1}[v^0, \mathbf{p}^0, v^1, \mathbf{p}^1; \mathbf{g} = (0, -\mathbf{p}^1)] = \left[\bar{D}^1(v^1, \mathbf{p}^1; \mathbf{g} = (0, -\mathbf{p}^1)) - \bar{D}^0(v^1, \mathbf{p}^1; \mathbf{g} = (0, -\mathbf{p}^1)) \right] \quad (11)$$

Tomando la media de las expresiones (10) y (11) se obtiene:

⁶ Boussemart et al. (2003) comparan el comportamiento relativo de los índices de *Malmquist* y *Luenberger*.

$$\text{TechCh}^{0,1}[\mathbf{v}^0, \mathbf{p}^0, \mathbf{v}^1, \mathbf{p}^1; \mathbf{g} = (0, -\mathbf{p})] = \frac{1}{2} \left[\left\langle \bar{D}^1(\mathbf{v}^0, \mathbf{p}^0; \mathbf{g} = (0, -\mathbf{p}^0)) - \bar{D}^0(\mathbf{v}^0, \mathbf{p}^0; \mathbf{g} = (0, -\mathbf{p}^0)) \right\rangle \right. \\ \left. + \left\langle \bar{D}^1(\mathbf{v}^1, \mathbf{p}^1; \mathbf{g} = (0, -\mathbf{p}^1)) - \bar{D}^0(\mathbf{v}^1, \mathbf{p}^1; \mathbf{g} = (0, -\mathbf{p}^1)) \right\rangle \right] \quad (12)$$

Este indicador de cambio técnico mide el aumento/reducción en las presiones medioambientales que resulta de los cambios en la tecnología entre los periodos 0 y 1.

Combinando el cambio en la eco-eficiencia y el cambio tecnológico de las expresiones (9) y (12) respectivamente, se obtiene lo que denominamos *indicador Luenberger de cambio proporcional en eco-comportamiento*:

$$\text{LEPCh}^{0,1}[\mathbf{v}^0, \mathbf{p}^0, \mathbf{v}^1, \mathbf{p}^1; \mathbf{g} = (0, -\mathbf{p})] = \text{EEffCh}^{0,1}[\mathbf{v}^0, \mathbf{p}^0, \mathbf{v}^1, \mathbf{p}^1; \mathbf{g} = (0, -\mathbf{p})] \\ + \text{TechCh}^{0,1}[\mathbf{v}^0, \mathbf{p}^0, \mathbf{v}^1, \mathbf{p}^1; \mathbf{g} = (0, -\mathbf{p})] \quad (13)$$

Este indicador mide el cambio en el eco-comportamiento y sus determinantes, el cambio en la eco-eficiencia y el cambio técnico, valorados en una dirección que reduce todas las presiones medioambientales proporcionalmente mientras que se mantiene el valor añadido. Esta descomposición sería equivalente a la descomposición dinámica del eco-comportamiento propuesta por Kortelainen (2008), pero utilizando en su cálculo índices *Luenberger* y funciones distancia direccionales en vez de índices *Malmquist* y distancias convencionales de *Shephard*. No obstante, el supuesto de proporcionalidad puede ser demasiado restrictivo, puesto que no permite representar algunas preferencias sobre el trade-off entre el comportamiento económico y el comportamiento ecológico que podrían resultar de interés para los investigadores y/o gestores de la política medioambiental.⁷

Alternativamente, el uso de funciones distancia direccionales e índices *Luenberger* permite valorar el cambio en el eco-comportamiento en términos no proporcionales. Consideremos, en consecuencia, que estamos interesados en valorar el cambio en el eco-comportamiento en un escenario en el que se reduce sólo una presión medioambiental o un grupo de presiones, representadas por i , manteniendo el valor añadido y el resto de presiones, representadas por $-i$. En este escenario, la función distancia direccional que valora la eco-eficiencia en t es:

$$\text{Eco-efficiency}_i^t = \text{EEff}_i^t = \bar{D}_i^t[\mathbf{v}^t, \mathbf{p}^t; \mathbf{g} = (0, (-\mathbf{p}_i^t, \mathbf{0}))] = \text{Sup} \left[\beta_i \mid ((1 - \beta_i) \mathbf{p}_i^t, \mathbf{p}_{-i}^t) \in \text{PRS}^t(\mathbf{v}^t) \right] \quad (14)$$

Además, el cambio en la eco-eficiencia entre los periodos 0 y 1 en este escenario es:

⁷ Además, bajo este supuesto no se tienen en cuenta los slacks en el valor añadido y las presiones ambientales, aunque pueden resultar una importante fuente de ineficiencia (Mahlberg and Sahoo, 2011).

$$\begin{aligned} \text{EEffCh}_i^{0,1} [v^0, \mathbf{p}^0, v^1, \mathbf{p}^1; \mathbf{g} = (0, (-\mathbf{p}_i, \mathbf{0}))] &= \left[\bar{D}_i^0 (v^0, \mathbf{p}^0; \mathbf{g} = (0, (-\mathbf{p}_i^0, \mathbf{0}))) \right. \\ &\quad \left. - \bar{D}_i^1 (v^1, \mathbf{p}^1; \mathbf{g} = (0, (-\mathbf{p}_i^1, \mathbf{0}))) \right] \end{aligned} \quad (15)$$

y el cambio técnico:

$$\begin{aligned} \text{TechCh}_i^{0,1} [v^0, \mathbf{p}^0, v^1, \mathbf{p}^1; \mathbf{g} = (0, (-\mathbf{p}_i, \mathbf{0}))] &= \frac{1}{2} \left[\left\langle \bar{D}_i^1 (v^0, \mathbf{p}^0; \mathbf{g} = (0, (-\mathbf{p}_i^0, \mathbf{0}))) \right\rangle \right. \\ &\quad \left. - \left\langle \bar{D}_i^0 (v^0, \mathbf{p}^0; \mathbf{g} = (0, (-\mathbf{p}_i^0, \mathbf{0}))) \right\rangle \right] \\ &\quad + \left[\left\langle \bar{D}_i^1 (v^1, \mathbf{p}^1; \mathbf{g} = (0, (-\mathbf{p}_i^1, \mathbf{0}))) \right\rangle \right. \\ &\quad \left. - \left\langle \bar{D}_i^0 (v^1, \mathbf{p}^1; \mathbf{g} = (0, (-\mathbf{p}_i^1, \mathbf{0}))) \right\rangle \right] \end{aligned} \quad (16)$$

Finalmente, el indicador de cambio en eco-comportamiento entre los periodos 0 y 1 en este escenario, al que denominamos *indicador Luenberger de cambio en eco-comportamiento específico por presión*, puede definirse para la presión o grupo de presiones i como:

$$\begin{aligned} \text{LEPCh}_i^{0,1} [v^0, \mathbf{p}^0, v^1, \mathbf{p}^1; \mathbf{g} = (0, (-\mathbf{p}_i, \mathbf{0}))] &= \text{EEffCh}_i^{0,1} [v^0, \mathbf{p}^0, v^1, \mathbf{p}^1; \mathbf{g} = (0, (-\mathbf{p}_i, \mathbf{0}))] \\ &\quad + \text{TechCh}_i^{0,1} [v^0, \mathbf{p}^0, v^1, \mathbf{p}^1; \mathbf{g} = (0, (-\mathbf{p}_i, \mathbf{0}))] \end{aligned} \quad (17)$$

El principal interés en valorar el eco-comportamiento dinámico y sus determinantes utilizando funciones distancia direccionales y direcciones específicas por presión es que los indicadores *Luenberger* proporcional y no-proporcional pueden producir diferentes tasas de cambio en el eco-comportamiento, cambio en la eco-eficiencia y cambio técnico.⁸ Es más, cabe esperar que las estimaciones también difieran en función de la dirección específica elegida para la reducción en las presiones medioambientales. En nuestra opinión, estas características podrían proporcionar información valiosa a los responsables políticos, ayudándoles a diseñar mejores políticas ambientales. La Figura 1 ilustra esta afirmación con respecto al cambio técnico.

En el gráfico se considera una tecnología que genera un valor añadido v y dos presiones medioambientales p_1 y p_2 , y que está representada por el *conjunto de requerimientos de presiones* $\text{PRS}(v)$. En aras de la simplicidad, evaluamos el cambio técnico proyectando la observación de la DMU k en el periodo 1, a saber k^1 , sobre las fronteras eco-eficientes de los períodos 0 y 1. Proyectar en una dirección que reduce p_2 manteniendo p_1 y el valor añadido en sus niveles

⁸ Además, nuestra aproximación DEA también puede considerar otros escenarios que tengan en cuenta, por ejemplo, mejoras en el comportamiento económico mientras que las presiones medioambientales se mantienen, o bien, situaciones en las que simultáneamente se aumenta el valor añadido y se reducen las presiones medioambientales.

observados permite evaluar el ahorro potencial en la presión p_2 que se podría alcanzar como consecuencia del cambio técnico. Este potencial se encuentra representado por el segmento FE y se obtiene como la diferencia entre las funciones de distancia direccionales de observación k^1 proyectada sobre las fronteras eco-eficientes de los períodos 1 y 0. Alternativamente, con una dirección que sólo reduce la presión p_1 , manteniendo el valor añadido y la presión p_2 , el ahorro potencial debido al cambio técnico entre 0 y 1 sería CD. La Figura 1 muestra también el ahorro potencial en las presiones p_1 y p_2 que resultaría del cambio técnico en un escenario en que se supone reducción proporcional en ambas presiones, segmento AB. Es de destacar que la contribución del cambio técnico al cambio en el eco-comportamiento es diferente en función de la dirección considerada.

2.2. Cálculo de funciones distancia direccionales con Análisis Envolvente de Datos (DEA)

La técnica DEA es una aproximación no-paramétrica a la medición de la eficiencia propuesta inicialmente por Charnes et al. (1978) que ha sido ampliamente utilizada en la literatura (ver Cook and Seiford 2009). En esencia, el análisis DEA utiliza métodos de programación matemática para comparar, en términos de un indicador de comportamiento, la posición relativa de una DMU con respecto a las mejores prácticas observadas en la muestra a la que ésta pertenece (ver detalles en Cooper et al. 2007). Una importante ventaja del DEA para construir indicadores compuestos, en un contexto como el de este trabajo donde no disponemos de precios para las presiones medioambientales, es que el conjunto de ponderaciones utilizado para agregar las presiones medioambientales se genera endógenamente. Basándose en el *principio del beneficio de la duda* (Cherchey et al. 2007), DEA asigna a cada DMU evaluada el conjunto de ponderaciones que la sitúa en la posición más favorable cuando se la compara con las demás DMUs de la muestra utilizando ese mismo conjunto de ponderaciones.⁹

Utilizando una dirección que reduce proporcionalmente todas las presiones medioambientales, el programa DEA necesario para calcular la función de distancia direccional de una observación o DMU k' en el período 0 con respecto a la tecnología contemporánea es:

⁹ En algunos casos el conjunto de ponderaciones óptimas puede asignar gran importancia (ponderaciones) a presiones consideradas poco relevantes. Kuosmanen y Kortelainen (2005) proponen abordar este problema imponiendo restricciones *a priori* sobre la importancia relativa de diferentes presiones medioambientales. Allen y Thanassoulis (2004) revisan diversas técnicas para incorporar restricciones sobre las ponderaciones en los modelos DEA.

Maximizar $\beta_{k', z_k} \bar{D}^0 [v^0, p^0; g = (0, -p^0)] = \beta_{k'}$

sujecto a:

$$\begin{aligned} v_{k'}^0 &\leq \sum_{k=1}^K z_k v_k^0 & (i) \\ (1 - \beta_{k'}) p_{k'n}^0 &\geq \sum_{k=1}^K z_k p_{kn}^0 \quad n = 1, \dots, N & (ii) \\ z_k &\geq 0 \quad k = 1, \dots, K & (iii) \end{aligned} \quad (18)$$

donde z_k representa la ponderación asignada a cada DMU k de la muestra en la composición de una observación *virtual*, situada sobre la frontera eco-eficiente, con la que se compara k' .

El cálculo de la función distancia direccional de la DMU k' en este escenario en el periodo 0 con respecto a la tecnología del periodo 1 requiere resolver el siguiente programa lineal:

Maximizar $\beta_{k', z_k} \bar{D}^1 [v^0, p^0, v^1, p^1; g = (0, -p^0)] = \beta_{k'}$

sujecto a:

$$\begin{aligned} v_{k'}^0 &\leq \sum_{k=1}^K z_k v_k^1 & (i) \\ (1 - \beta_{k'}) p_{k'n}^0 &\geq \sum_{k=1}^K z_k p_{kn}^1 \quad n = 1, \dots, N & (ii) \\ z_k &\geq 0 \quad k = 1, \dots, K & (iii) \end{aligned} \quad (19)$$

Por otro lado, con un vector dirección que reduce una única presión o un grupo de presiones medioambientales i , la función distancia direccional de la DMU k' en el periodo 0 con respecto a su tecnología contemporánea, y la función distancia direccional con respecto a la tecnología del periodo 1 pueden calcularse, respectivamente, como:

Maximizar $\beta_{ik', z_k} \bar{D}^0 [v^0, p^0; g = (0, (-p_i^0, 0))] = \beta_{ik'}$

sujecto a:

$$\begin{aligned} v_{k'}^0 &\leq \sum_{k=1}^K z_k v_k^0 & (i) \\ (1 - \beta_{ik'}) p_{ik'}^0 &\geq \sum_{k=1}^K z_k p_{ik}^0 \quad i \in n \text{ and } i \notin -i & (ii) \\ p_{-ik'}^0 &\geq \sum_{k=1}^K z_k p_{-ik}^0 \quad n = 1, \dots, N & (iii) \\ z_k &\geq 0 \quad k = 1, \dots, K & (iv) \end{aligned} \quad (20)$$

y

Maximizar $\beta_{ik', z_k} \bar{D}^1 [v^0, p^0, v^1, p^1; g = (0, (-p_i^0, 0))] = \beta_{ik'}$

sujecto a:

$$\begin{aligned} v_{k'}^0 &\leq \sum_{k=1}^K z_k v_k^1 & (i) \\ (1 - \beta_{ik'}) p_{ik'}^0 &\geq \sum_{k=1}^K z_k p_{ik}^1 \quad i \in n \text{ and } i \notin -i & (ii) \\ p_{-ik'}^0 &\geq \sum_{k=1}^K z_k p_{-ik}^1 \quad n = 1, \dots, N & (iii) \\ z_k &\geq 0 \quad k = 1, \dots, K & (iv) \end{aligned} \quad (21)$$

En los programas (18) a (21), al no restringir la suma de los elementos del vector de intensidades, hemos supuesto que la tecnología presenta rendimientos constantes a escala (Banker et al. 1984); Picazo-Tadeo et al. (2012) proporcionan una justificación detallada de este supuesto en el contexto de la medición de la eco-eficiencia. La formulación de los programas necesarios para obtener las funciones distancia direccionales contemporáneas de la observación k' en el periodo 1, así como las funciones distancia direccionales con respecto a la tecnología en el periodo 0, se deja para el lector puesto que sólo requiere pequeños cambios en la notación.

3. Eco-eficiencia dinámica en las emisiones de gases de efecto invernadero en la UE-27

3.1. Variables y datos

En este trabajo se utilizan datos de los Estados miembros de la UE-27 sobre emisiones de los tres principales gases de efecto invernadero (GEI) cuya reducción fue objeto de acuerdo en el *Protocolo de Kioto*, a saber, dióxido de carbono (CO_2), óxido nitroso (N_2O) y metano (CH_4). Conjuntamente estos gases representan alrededor del 98% de las emisiones agregadas de los GEI en la UE-27. Las cifras provienen de *Annual European Union Greenhouse Inventory 1990-2010* de la *European Environmental Agency* (EEA, 2012a)¹⁰ y abarcan el período 1990-2010. Las actividades incluidas en los agregados de emisiones de GEI son energía, procesos industriales, disolventes y otros, agricultura, residuos y, por último otros sectores. Las emisiones están medidas en millones de toneladas equivalentes de CO_2 . La Tabla 1 muestra las emisiones de GEI en 1990 y 2010.

El valor de los bienes y servicios producidos representa el comportamiento económico de los países de la UE-27 y se mide por el Producto Interno Bruto (PIB) (US\$ constantes, base 2000), utilizando datos del *World Bank*.¹¹ La intensidad de las emisiones de GEI, definida como la ratio entre las emisiones y el PIB, en la UE-27 se ha reducido de forma considerable desde un promedio de 0,79 toneladas equivalentes de CO_2 por cada 1,000 US\$ de PIB en 1990-92 a 0,49 en 2008-10. Las reducciones son particularmente importantes en los países del Este que se incorporaron a la UE en 2004 y 2007, países cuya intensidad de las emisiones de GEI era notablemente superior. En los países de la antigua Unión Europea-15 (UE-15) las reducciones son también importantes, aunque algo menores.¹² Finalmente cabe destacar que los patrones de

¹⁰ Acceso el 9 de Octubre de 2012 a través de <http://dataservice.eea.europa.eu>

¹¹ Acceso el 9 de Octubre de 2012 a través <http://databank.worldbank.org>

¹² Los cálculos sobre la intensidad de emisiones para países individuales están disponible bajo petición.

comportamiento en la intensidad de las emisiones de los distintos gases, individualmente considerados, son bastante similares.

3.2. *Eco-comportamiento dinámico: cambio técnico versus cambio en eco-eficiencia*

El eco-comportamiento dinámico de cada miembro de la UE-27 ha sido valorado en cuatro escenarios que contemplan diferentes objetivos en torno a la reducción de los GEI, a saber, una reducción proporcional conjunta de los tres gases considerados, y reducciones específicas de cada uno de ellos, CO₂, N₂O y CH₄. Los resultados figuran en la Tabla 2 que muestra las tasas medias de crecimiento por países en el período 1990-2010 del *indicador de cambio de eco-comportamiento de Luenberger* y sus determinantes, *cambio en la eco-eficiencia* y *cambio técnico*. Dado el carácter aditivo de las funciones distancia direccionales, vale la pena recordar aquí que la tasa de crecimiento del eco-comportamiento puede obtenerse como la suma de las tasas de crecimiento de la eco-eficiencia y el cambio técnico.

Antes de proceder a comentar los resultados, es conveniente mencionar que cuando se compara la observación de un período respecto a la tecnología de un periodo diferente, existe la posibilidad de que la observación evaluada esté ubicada fuera del conjunto tecnológico generador de presiones, por lo que no existe una solución para estas observaciones *super-eficientes*.¹³ Esta situación se ha producido en algunos casos que implican principalmente a tres países que en general están situados en la frontera eco-eficiente Suecia, Malta y Luxemburgo, y en algunos años del final del período estudiado, al Reino Unido. En estos casos, los promedios temporales para el cambio en el eco-comportamiento y el cambio técnico del periodo 1990-2010 se han calculado sólo si estaban disponibles las tres cuartas partes o más de las tasas de crecimiento anuales. Asimismo, para mantener la propiedad de aditividad del eco-comportamiento en los promedios de la UE-27, éstos se han calculado excluyendo los cuatro países mencionados.

En relación a los resultados del análisis, en el escenario donde todos los GEI se reducen en la misma proporción, i.e., *eco-comportamiento proporcional en GEI*, el eco-comportamiento en la UE-27 ha mejorado durante el período 1990-2010 a una tasa anual promedio de 1,36%. Además, el progreso técnico, con un crecimiento promedio anual de 1,23%, ha sido con mu-

¹³ Bricc y Kerstens (2009) abordan el problema de la inviabilidad de soluciones y las funciones distancia direccional en el marco del indicador de productividad *Luenberger* y exploran la posibilidad de hallar alguna solución para remediar el problema, concluyendo que no existe una solución fácil.

cho el principal impulsor de la mejora en el eco-comportamiento, mientras que la eco-eficiencia apenas ha crecido a una tasa promedio de 0,12%.

Los países que muestran las más altas tasas de crecimiento en eco-comportamiento son los Países Bajos, Alemania, Austria y algunos países escandinavos como Finlandia y Dinamarca. En el extremo opuesto, el peor comportamiento se observa en los países de Europa del Este incorporados a la UE-27 en los años 2004 y 2007, en particular Hungría, Rumania y Bulgaria, así como en algunos países del sur de Europa como España y Portugal. En cuanto a los países que impulsan el cambio técnico, cuatro economías figuran como innovadoras; entre ellas, el Reino Unido es innovador sólo en unos pocos años al final del período estudiado mientras que Luxemburgo, Malta y Suecia son identificados como países innovadores, año tras año, en casi todo el periodo. Finalmente, las mejoras más destacadas en eco-eficiencia corresponden a Alemania, Países Bajos y el Reino Unido¹⁴, mientras que la ésta incluso empeora en algunos países como Italia, España o Portugal. En términos generales, estos resultados coinciden con los obtenidos por Kortelainen (2008).

En los escenarios en los que se evalúa el eco-comportamiento en el ámbito específico de los distintos GEI considerados, i.e., *eco-comportamiento específico por gas*, el cambio tecnológico también resulta ser el principal motor de las mejoras conseguidas en el eco-comportamiento de los países de la UE-27. Aun así, se observan diferencias entre contaminantes. El eco-comportamiento en CO₂, N₂O y CH₄ mejora entre 1990 y 2010 a unas tasas medias anuales de 0,73%, 1,39% y 1,02%, respectivamente. Sin embargo, la eco-eficiencia se ha mantenido prácticamente estancada en los tres casos, reduciéndose incluso en los casos de CO₂ y CH₄ a unas tasas medias de 0,12% y 0,15%, respectivamente. Por último, al comparar los resultados obtenidos para los distintos gases el mayor cambio técnico se ha registrado en los casos de las emisiones de N₂O y CH₄, con tasas de crecimiento de 1,23% y 1,16%, respectivamente.

Con el propósito de facilitar información adicional sobre los niveles relativos de eco-eficiencia entre los Estados miembros de la UE-27, la Tabla 3 muestra los promedios de eco-eficiencia al principio y al final del período analizado. Para el período 2008-10, el promedio para la UE-27 del indicador de eco-eficiencia proporcional en GEI es de 0,465, lo que indica que podría lograrse una reducción proporcional en los tres tipos de emisiones del 46,5%, al tiempo que se mantiene el PIB en los niveles observados. En promedio, los indicadores específicos de eco-eficiencia para el CO₂, N₂O y CH₄ son 0,582, 0,575 y 0,603, respectivamente. Así, aunque las

¹⁴ Estudios recientes también han encontrado importantes mejoras en el comportamiento ecológico-económico/eficiencia en el Reino Unido (Kortelainen, 2008; Marrero, 2010).

diferencias entre gases contaminantes son relativamente pequeñas, el comportamiento más eco-eficiente en la UE-27 se registra para el N_2O y el menos eco-eficiente para el CH_4 . En relación a los países individualmente considerados, cabe destacar que las economías eco-eficientes con las que se comparan los otros países de la muestra son Luxemburgo, Malta, Suecia y Reino Unido; otros países altamente eco-eficientes son Alemania, Austria, Países Bajos y Alemania. Por el contrario, el peor comportamiento en términos de eco-eficiencia se observa, con diferencia, en las economías que ingresaron en la UE-27 en 2004 y 2007 como Bulgaria, Rumania, Estonia y Polonia. El perfil de eco-eficiencia observado en 1990-92 es bastante similar, con países del centro de Europa y algunas economías escandinavas entre los más eco-eficientes y los países más recientemente incorporados a la UE-27 ocupando la parte inferior del ranking.

4. Discusión e implicaciones de política.

El calentamiento global y el cambio climático son, como se indica en la introducción, cuestiones de creciente interés para los responsables políticos a nivel mundial. Antes de los años noventa de la pasada centuria, en la Unión Europea (UE) sólo existían normas que regulaban las emisiones de algunos gases contaminantes. Sin embargo, en el *5th Environmental Action Program* se estableció un conjunto de objetivos a largo plazo para mejorar la calidad del aire mediante el establecimiento de límites máximos para contaminantes como el CO_2 . En el *Protocolo de Kioto* los miembros de la antigua UE-15 acordaron reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero, fijando como objetivo para año 2012 una reducción del 8% respecto a los niveles registrados en 1990. Más tarde, en 2002, el *6th Environmental Action Program* estableció el marco de la política ambiental en la Unión Europea durante el período 2002-2012, identificando el cambio climático como un área de acción prioritaria. En marzo de 2008, el Consejo Europeo aprobó el *UE Climate and Energy Package*, que contempla un conjunto de medidas contra el cambio climático e implementa el denominado *objetivo 20-20-20*, según el cual en 2020 la UE debería alcanzar una cuota del 20% de energías renovables en el consumo de energía, lograr un ahorro en el consumo energético del 20% y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 20% con respecto a los niveles de 1990. Adicionalmente la UE ofrece elevar esta reducción al 30% si, en un esfuerzo global, otros países desarrollados acuerdan aumentar sus reducciones.

Según la *European Environmental Agency* (EEA, 2012a), el objetivo acordado por la UE-15 en el marco del *Protocolo de Kioto* está camino de ser superado con creces, y se estima que las emisiones en 2010 se habían reducido un 10,6% con respecto a 1990. Aunque las previsiones indican que casi todos los miembros de la UE-15 alcanzarán sus propios objetivos de Kioto, las

diferencias entre países son significativas; así, algunas economías mediterráneas han aumentado sus emisiones por encima de lo permitido por sus cuotas de participación en el objetivo global. Al mismo tiempo, la mayoría de los países de Europa del Este que ingresaron en la UE en 2004 y 2007 también han aceptado objetivos que implican una importante reducción de emisiones de modo que en 2010 la reducción agregada de emisiones de GEI en la UE-27 ha alcanzado el 15,4% (Tabla 1). Además, de acuerdo con la EEA (2012b), la mayoría de los miembros de la UE prevé que en 2020 las emisiones fuera del *EU Emissions Trading System*¹⁵ serán inferiores a los objetivos nacionales fijados en el *UE Climate and Energy Package*. Sin embargo, los responsables políticos europeos reconocen que seguirá siendo necesario realizar más esfuerzos para lograr una mayor reducción de las emisiones a largo plazo.

Más allá de la reducción en las emisiones de GEI alcanzada por la UE-27 desde 1990, que ha mejorado notablemente el comportamiento ecológico, nuestros resultados muestran que cuando el comportamiento económico y el comportamiento ecológico se consideran de forma conjunta también se ha producido una significativa mejora. Además, el cambio tecnológico ha sido, con diferencia, la principal fuerza impulsora de la mejora en el comportamiento ecológico, mientras que, en promedio, la eco-eficiencia incluso ha disminuido en el caso de algunos gases contaminantes. Una conclusión de política medioambiental derivada de estos resultados es que se requieren más esfuerzos por parte de las autoridades europeas para fomentar el *catching-up* entre los países europeos por lo que se refiere a su eco-eficiencia. Las políticas de investigación orientadas hacia el desarrollo de nuevas tecnologías ahorradoras de emisiones podrían no ser suficientes si los países europeos no adoptan en sus procesos de producción las mejores prácticas en la gestión de gases contaminantes, acercándose, por tanto, a la frontera tecnológica.¹⁶

Las diferencias de eco-eficiencia entre países europeos pueden deberse a sus respectivas capacidades para gestionar conjuntamente los procesos de producción y el medio ambiente, pero también a circunstancias como diferentes niveles de desarrollo, diferencias en la conciencia

¹⁵ El *EU Emissions Trading System* es una de las piedras angulares de la política de la UE contra el cambio climático, que funciona bajo el principio de límite y comercio, es decir, hay un límite en la emisión de gases de efecto invernadero, pero las compañías reciben derechos de emisión que pueden vender o comprar unos a otros, según sea necesario.

¹⁶ El impulso a las innovaciones ecológicas y la eco-eficiencia ha sido, de hecho, uno de los pilares básicos de la UE para alcanzar los objetivos de competitividad contemplados en la *Agenda de Lisboa* (CE, 2010).

ambiental de los ciudadanos o, especialmente, diferencias en las estructuras de producción.¹⁷ Entre los países más eco-eficientes en nuestro caso de estudio, Luxemburgo es la economía más rica de la UE-27 y tiene una estructura productiva altamente orientada hacia los servicios, en especial banca y finanzas. Suecia es un país europeo altamente desarrollado cuyos ciudadanos, al igual que en otras sociedades escandinavas, han mostrado tradicionalmente una elevada conciencia medioambiental. En contraste, los países menos eco-eficientes, mayoritariamente países recientemente integrados en la UE-27, tienen estructuras de producción con predominio de actividades industriales más contaminantes; además, las regulaciones medioambientales y la concienciación de sus ciudadanos por los problemas del medioambiente son más recientes que en otros países europeos occidentales.

La mayoría de los factores antes mencionados, como la conciencia medioambiental de los ciudadanos o la estructura de producción, sólo cambian en el medio y largo plazo. Sin embargo, ello no implica necesariamente que ciertas medidas de política medioambiental para impulsar la eco-eficiencia no puedan ser efectivas en el corto plazo. Entre otras, estas políticas deben centrarse en aspectos tales como reducir el uso de energía en los procesos de producción, o *intensidad energética*, o disminuir la *intensidad de emisiones* por unidad de energía consumida, la cual depende básicamente de las fuentes de energía primaria empleadas; i.e., mientras que las energías de combustión de fósiles como el carbón o el petróleo generan elevadas emisiones de GEI, las emisiones son mucho menores en las energías renovables.

En consecuencia, por un lado, resulta necesario establecer más y mejores incentivos en la UE-27 para reducir las emisiones de GEI mediante un cambio hacia fuentes de energía más limpias. Las medidas de política medioambiental en esta dirección deben desempeñar un papel importante en el caso de contaminantes como el metano y, también, en los países del Este miembros de la UE-27 que, según los resultados obtenidos en este trabajo, presentan los registros más pobres en cuanto a sus indicadores de eco-eficiencia. Por otro lado, las políticas medioambientales deben fomentar el uso de tecnologías que reduzcan la dependencia energética en los procesos de producción para que, mediante el ahorro energético, se produzca una mejora en la eco-eficiencia. Además, en la medida en que las ineficiencias ecológico-económicas están más que probablemente relacionadas con una gestión técnica inadecuada de los factores

¹⁷ Las estructuras de producción están, a su vez, influidas por la dotación de los recursos productivos de los países, el comercio internacional y los flujos de inversión directa extranjera, i.e., algunos países desarrollados podrían reasignar actividades contaminantes hacia los países en desarrollo con bajos estándares ambientales (*pollution haven hypothesis*).

de producción, i.e., uso excesivo de inputs, entre ellos la energía, también serían adecuadas políticas más generales dirigidas a fomentar las habilidades y capacidades de gestión.

Resulta evidente que, en su mayoría, las recomendaciones de política antes mencionadas no son nuevas, ya que algunas de ellas son piedras angulares de la actual política medioambiental contra el cambio climático en la UE. No obstante, en nuestra opinión, la realización de estudios dirigidos a proporcionar una base científica para las políticas medioambientales europeas, en particular desde perspectivas renovadas, como la que se propone en este trabajo en el que se combina el comportamiento ecológico con el comportamiento económico, es una obligación para los investigadores en el campo de la economía ecológica. En esta línea de investigación, el trabajo reciente de Mahlberg et al. (2011) utiliza índices de *Malmquist* para analizar el cambio en la eco-productividad en 14 países de la Unión Europea durante el período 1995-2004. En este trabajo las emisiones de GEI se consideran un output no deseado de los procesos de producción y, a diferencia de nuestro enfoque, se incluyen el trabajo y el capital para analizar la contribución conjunta de estos inputs y los GEI a los cambios en la eco-productividad y sus determinantes. Los resultados indican que el crecimiento de la eco-productividad en ese periodo fue debido principalmente a la mejora de las condiciones medioambientales.

Por su parte, Marrero (2010) ha estimado que la elasticidad de las emisiones de GEI al consumo de energía en la UE es significativamente mayor que cero, pero menor que la unidad. En consecuencia, serían necesarias reducciones en el consumo de energía más que proporcionales para conseguir el objetivo establecido sobre las emisiones de GEI, en la medida que los tres objetivos del *EU Climate and Energy Package* están fuertemente relacionados. Sin ánimo de exhaustividad, otros artículos que proporcionan información interesante para las políticas europeas contra el cambio climático son Bengochea (2012), Camarero et al (2013a,b) y Duro y Padilla (2013).

5. Conclusiones y sugerencias para futuras investigaciones

El concepto de *comportamiento ecológico-económico*, más conocido como *eco-comportamiento*, se desarrolló en la década de 1990 como una herramienta empírica para abordar el estudio de la *sostenibilidad*. Después de dos décadas de investigación, el análisis de la relación entre la actividad económica y el medio ambiente mantiene un importante protagonismo en el campo de la economía ecológica. Basándose en los trabajos previos de Kortelainen (2008) y Picazo Tadeo et al. (2012), en este artículo se propone un enfoque metodológico para evaluar el eco-comportamiento dinámico y sus determinantes, a saber, el cambio en la eficiencia ecológica-

económica y el cambio técnico, a nivel de presiones medioambientales específicas. Con este propósito se utilizan técnicas de *Análisis Envolvente de Datos*, funciones distancia direccionales e índices *Luenberger*. La principal fortaleza de este enfoque es que permite evaluar el eco-comportamiento en diferentes escenarios, que pueden representar las preferencias de los políticos, o de la sociedad, respecto al *trade-off* existente entre comportamiento económico y comportamiento ecológico. Este enfoque se utiliza para evaluar los determinantes de la evolución del eco-comportamiento en las emisiones de gases de efecto invernadero en la Unión Europea-27 durante el período 1990-2010. El interés de este análisis es, en nuestra opinión, que proporciona a los políticos europeos una evaluación conjunta de los aspectos ecológicos y económicos relacionados con los gases de efecto invernadero y su dinámica, lo cual podría ayudar a diseñar mejores políticas para combatir el cambio climático.

Los principales resultados pueden sintetizarse del siguiente modo. En primer lugar, el eco-comportamiento en la Unión Europea-27 ha mejorado notablemente entre 1990 y 2010 en los tres gases considerados, dióxido de carbono (CO₂), óxido nitroso (N₂O) y el metano (CH₄), y la principal mejora corresponde a los casos de N₂O y CH₄. En segundo lugar, estas mejoras son debidas en su práctica totalidad al progreso técnico puesto que, en promedio, la eco-eficiencia se ha mantenido prácticamente estancada e incluso se ha reducido en el caso del CO₂ y el CH₄. En tercer lugar, algunas economías centroeuropeas, como Holanda, Alemania, Austria, y los países escandinavos, muestran las tasas más altas de mejora del eco-comportamiento, mientras que los menores ritmos se observan en los países de Europa del Este, en particular Hungría, Rumania y Bulgaria, y en algunos países del sur de Europa como España y Portugal. En cuarto y último lugar, Luxemburgo, Malta, Suecia y el Reino Unido son los países innovadores, mientras que los países del Este que ingresaron en la Unión Europea en 2004 y 2007 son los que se encuentran más alejados de la frontera tecnológica.

La principal implicación de política que se deriva de estos resultados es que, además de reforzar las políticas de investigación y el desarrollo de innovaciones ahorradoras de emisiones de gases de efecto invernadero, surge la necesidad de articular medidas que impulsen la convergencia hacia la frontera tecnológica de los países miembros de la Unión Europea; en otras palabras, se requieren medidas destinadas a facilitar el uso de las nuevas tecnologías ahorradoras de emisiones. Estas políticas medioambientales deben contribuir a reducir la intensidad energética y la intensidad de las emisiones por unidad de energía, en particular en el caso de los gases de efecto invernadero N₂O y CH₄ y en los países que muestran los peores registros en cuanto a eco-eficiencia, que son la mayoría de los países del Este recientemente incorporados a la Unión Europea-27.

Finalmente, es necesario mencionar algunas limitaciones que deben tenerse en cuenta a la hora de interpretar los resultados de esta investigación, a la vez que subrayar algunas líneas de trabajo para el futuro. Por un lado, nuestros resultados sobre potenciales reducciones de gases de efecto invernadero no son medidas absolutas del comportamiento ecológico de los países, sino más bien medidas de comportamiento ecológico en relación al comportamiento económico. Además, las reducciones potenciales deben ser entendidas en términos relativos, dado que la reducción absoluta será distinta en dos países con el mismo nivel de eco-eficiencia y diferentes niveles de emisiones. Ambas circunstancias deben tenerse en cuenta al diseñar políticas medioambientales orientadas a potenciar la sostenibilidad. En este sentido, mejoras en la eco-eficiencia no implican necesariamente mayor sostenibilidad, ya que el concepto de sostenibilidad tiene en cuenta el valor absoluto de las emisiones y la capacidad del medio ambiente para absorberlos. Sin embargo, mejorar la eco-eficiencia es a menudo la manera menos gravosa de reducir las presiones medioambientales que amenazan la sostenibilidad; asimismo, las políticas destinadas a mejorar la eco-eficiencia son más fáciles de implementar que medidas más drásticas que limiten el nivel de actividad económica. En consecuencia, las mejoras de eco-eficiencia podrían ser consideradas como un ingrediente esencial para obtener a un coste mínimo las mejoras medioambientales que la sociedad demanda.

Por otro lado, futuros trabajos en este campo de investigación deberían afrontar algunos desafíos metodológicos tales como, incorporar un esquema de preferencias no lineales en la construcción del indicador compuesto de presión medioambiental agregada; controlar por las diferentes estructuras de producción o los flujos de inversión extranjera en la evaluación del eco-comportamiento; o, también, el desarrollo con funciones distancia direccionales de otras medidas de eco-comportamiento basadas en las holguras. Finalmente, desde una perspectiva empírica, una línea de investigación que, en nuestra opinión, sería de notable interés para el diseño de políticas dirigidas a fomentar la sostenibilidad, consistiría en ampliar el enfoque metodológico propuesto en este trabajo utilizando conceptos de eco-comportamiento más amplios que incluyan, además de los resultados económicos y ecológicos, otras dimensiones de la sostenibilidad como el comportamiento social.

Referencias bibliográficas

- Allen, R., Thanassoulis, E., 2004. Improving envelopment in data envelopment analysis. *European Journal of Operational Research* 154(2), 363-379.
- Banker, R., Charnes, R., Cooper, W., 1984. Some models for estimating technical and scale inefficiencies in Data Envelopment Analysis. *Management Science* 30(9), 1078-1092.

- Beltrán-Esteve, E., Gómez-Limón, J.A., Picazo-Tadeo, A.J., Reig-Martínez, E., 2013. A meta-frontier directional distance function approach to assessing eco-efficiency. *Journal of Productivity Analysis*, in press; doi 10.1007/s11123-012-0334-7.
- Bengochea, A., Faet-Gallur, O., 2012. Renewable energies and CO₂ emissions in the European Union. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 7(2), 121-130.
- Boussemart, J.P., Briec, W., Kerstens, K., Poutineau, J.C., 2003. Luenberger and Malmquist productivity indices: theoretical comparisons and empirical illustration. *Bulletin of Economic Research* 55, 391-405.
- Briec, W., Kerstens, K., 2009. Infeasibility and directional distance functions with application to the determinateness of the Luenberger productivity indicator. *Journal of Optimization Theory and Applications* 141, 55-73.
- Camarero, M., Castillo, J., Picazo-Tadeo, A.J., Tamarit, C., 2013a. Eco-efficiency and convergence in OECD countries. *Environmental and Resource Economics*, in press; doi 10.1007/s10640-012-9616-9.
- Camarero, M., Picazo-Tadeo, A.J., Tamarit, C., 2013b. Are the determinants of CO₂ emissions converging among OECD countries? *Economics Letters* 118, 159-162.
- Chambers, R., Chung, Y., Färe, R., 1998. Profit, directional distance functions and Nerlovian efficiency. *Journal of Optimization Theory and Applications* 98(2), 351-364.
- Chambers, R.G., Färe, R., Grosskopf, S., 1996. Productivity growth in APEC countries. *Pacific Economic Review*, 1996, 1(3): 181-90.
- Charnes, A., Cooper, W.W., Rhodes, E., 1978. Measuring the efficiency of decision making units. *European Journal of Operational Research* 2, 429-444.
- Cherchye, L., Moesen, W., Rogge, N., van Puyenbroek, T., 2007. An introduction to 'benefit of the doubt' composite indicators. *Social Indicators Research* 82(1), 111-145.
- Cook, W.D., Seiford, L.M., 2009. Data envelopment analysis (DEA)-Thirty years on. *European Journal of Operational Research* 192, 1-17.
- Cooper, W.W., Seiford, L.M., Tone, K., 2007. *Data Envelopment Analysis. A comprehensive text with models, applications, references and DEA-Solver software*. Springer, New York.
- Duro, J.A. and Padilla, E., 2013. Cross-country polarisation in CO₂ emissions per capita in the European Union: Changes and explanatory factors. *Environmental and Resource Economics*, in press; doi 10.1007/s10640-012-9607-x
- Dyckhoff, H., Allen, K., 2001. Measuring ecological efficiency with data envelopment analysis (DEA). *European Journal of Operational Research* 132, 312-325.

- EC, European Commission, 2010. Europe 2020: A European strategy for smart, sustainable and inclusive growth. Communication COM(2010) 2020. Brussels.
- EEA, European Environment Agency, 2012b. Greenhouse gas emission trends and projections in Europe 2012. Tracking progress towards Kyoto and 2020 targets. Technical report, 6/2012, Luxembourg.
- EEA, European Environmental Agency, 2012a. Annual European Union greenhouse gas inventory 1990–2010 and inventory report 2012. Technical report, 3/2012. Luxembourg.
- Färe, R., Grosskopf, S. 2000. Theory and application of directional distance functions. *Journal of Productivity Analysis* 13, 93-103.
- Huppes, G., Ishikawa, M., 2005a. Why eco-efficiency. *Journal of Industrial Ecology* 9(4), 2-5.
- Huppes, G., Ishikawa, M., 2005b. A framework for quantified eco-efficiency analysis. *Journal of Industrial Ecology*, 9, 25-41.
- Huppes, G., Ishikawa, M., 2009. Eco-efficiency guiding micro-level actions towards sustainability: Ten basic steps for analysis. *Ecological Economics* 68, 1687–1700.
- Korhonen, P.J., Luptacik, M., 2004. Eco-efficiency analysis of power plants: an extension of data envelopment analysis. *European Journal of Operational Research* 154(2), 437-446.
- Kortelainen, M., 2008. Dynamic environmental performance analysis: A Malmquist index approach. *Ecological Economics* 64, 701-715.
- Kuosmanen, T., Kortelainen, M., 2005. Measuring eco-efficiency of production with Data Envelopment Analysis. *Journal of Industrial Ecology* 9, 59-72.
- Mahlberg, B., Sahoo, B., 2011. Radial and non-radial decompositions of Luenberger productivity indicator with an illustrative application. *International Journal of Production Economics* 131, 721–726.
- Mahlberg, B., Luptacik, M., Sahoo, B., 2011. Examining the drivers of total factor productivity change with an illustrative example of 14 EU countries. *Ecological Economics* 72, 60–69.
- Malmquist, S., 1953. Index numbers and indifference surfaces. *Trabajos de Estadística* 4, 209–242.
- Marrero, G., 2010. Greenhouse gases emissions, growth and the energy mix in Europe. *Energy Economics* 32, 1356–1363.
- OECD, Organization for Economic Co-operation and Development, 1998. *Eco-efficiency*, OECD, Paris.

- Picazo-Tadeo, A.J., Beltrán-Esteve, M., Gómez-Limón, J.A. 2012. Assessing eco-efficiency with directional distance functions. *European Journal of Operational Research* 220, 798-809.
- Picazo-Tadeo, A.J., Gómez-Limón, J.A., Reig-Martínez, E., 2011. Assessing farming eco-efficiency: A Data Envelopment Analysis approach. *Journal of Environmental Management*, 92, 1154-1164.
- Picazo-Tadeo, A.J., Reig-Martínez, E., Hernández-Sancho, F., 2005. Directional distance functions and environmental regulation. *Resource and Energy Economics* 27, 131-142.
- Schaltegger, S., Synnestvedt, T., 2002. The link between 'green' and economic success: environmental management as the crucial trigger between environmental and economic performance. *Journal of Environmental Management* 65, 339-346.
- United Nations, 2009. Eco-efficiency indicators: Measuring resource-use efficiency and the impact of economic activities on the environment. *Greening of Economic Growth Series, ST/ESCAP/2561*.
- WCED, World Commission on Environment and Development, 1987. *Our common future*. Oxford University Press, Oxford.
- Zhang, B., Bi, J., Fan, Z., Yuan, Z., Ge, J., 2008. Eco-efficiency analysis of industrial system in China: a data envelopment analysis approach. *Ecological Economics*, 68, 306-316.
- Zhou, P., Ang, B.W., Poh, K.L., 2006. Comparing aggregating methods for constructing the composite environmental index: an objective measure. *Ecological Economics* 59, 305-311.

Figura 1

Tecnología generadora de presiones y eco-eficiencia dinámica específica por presión

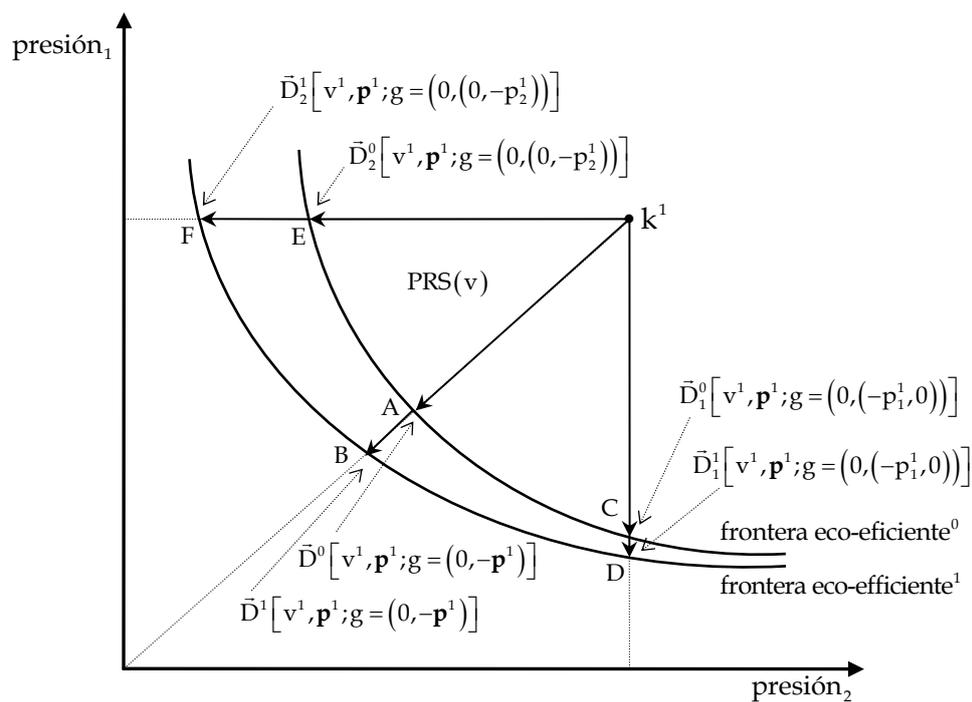


Tabla 1

Emisiones de gases de efecto invernadero en la Unión Europea-27
(Millones de toneladas equivalentes de CO₂)

	1990	2010
Dióxido de carbono (CO ₂)	4,419.9	3,891.3
Óxido nitroso (N ₂ O)	513.7	334.5
Metano (CH ₄)	590.3	400.7
Hexafluoruro de azufre (SF ₆)	10.9	6.5
Hidrofluorocarbonos (HFCs)	27.9	84.5
Perfluorocarbonos (PFCs)	20.4	3.4
Emisiones agregadas (GEI)	5,583.1	4,720.9

Nota: Los datos sobre las emisiones de SF₆, HFCs y PFCs se han incluido para ilustrar la escasa importancia de estos contaminantes en las emisiones totales de gases de efecto invernadero (GEI) de la EU-27.

Tabla 2

Comportamiento económico-ecológico dinámico en la Unión Europea-27: cambio en la eco-eficiencia *versus* cambio técnico
(Medias del período 1990-2010)

	Eco-comportamiento proporcional GEI			Eco-comportamiento en dióxido de carbono (CO ₂)		
	Indicador <i>Luenberger</i> de cambio en eco- comportamiento (LEPCh)	Cambio en eco- eficiencia (EEffCh)	Cambio técnico (TechCh)	Indicador <i>Luenberger</i> de cambio en eco- comportamiento (LEPCh)	Cambio en eco- eficiencia (EEffCh)	Cambio técnico (TechCh)
Alemania	0.0263	0.0060	0.0203	0.0153	0.0008	0.0146
Austria	0.0224	-0.0008	0.0232	0.0238	-0.0067	0.0305
Bélgica	0.0241	0.0003	0.0238	0.0080	-0.0021	0.0101
Bulgaria	0.0039	0.0018	0.0020	0.0024	0.0010	0.0014
Chipre	0.0129	-0.0001	0.0130	-0.0022	-0.0045	0.0023
Dinamarca	0.0179	-0.0035	0.0214	0.0118	-0.0031	0.0149
Eslovenia	0.0107	-0.0010	0.0117	0.0051	-0.0019	0.0070
España	0.0114	-0.0039	0.0153	0.0046	-0.0059	0.0104
Estonia	0.0059	0.0015	0.0044	0.0036	0.0015	0.0021
Finlandia	0.0206	0.0012	0.0195	-0.0049	-0.0050	0.0001
Francia	0.0121	-0.0055	0.0176	0.0121	-0.0055	0.0176
Grecia	0.0128	0.0019	0.0109	0.0038	-0.0031	0.0069
Holanda	0.0315	0.0137	0.0177	0.0135	0.0027	0.0109
Hungría	0.0058	0.0009	0.0049	0.0051	0.0007	0.0044
Irlanda	0.0171	0.0047	0.0125	0.0171	0.0047	0.0125
Italia	0.0165	-0.0047	0.0212	0.0058	-0.0119	0.0176
Letonia	0.0100	0.0037	0.0063	0.0100	0.0037	0.0063
Lituania	0.0100	0.0048	0.0051	0.0100	0.0048	0.0051
Luxemburgo ¹	-	0.0001	-	-	0.0313	-
Malta ¹	-	0.0000	-	-	0.0000	-
Polonia	0.0080	0.0036	0.0043	0.0050	0.0021	0.0029
Portugal	0.0111	-0.0038	0.0149	0.0026	-0.0074	0.0100
Reino Unido ¹	0.0407	0.0176	0.0207	0.0685	0.0224	0.0550
República Checa	0.0078	0.0029	0.0049	0.0039	0.0011	0.0027
República Eslovaca	0.0091	0.0031	0.0060	0.0079	0.0039	0.0040
Rumania	0.0043	0.0016	0.0027	0.0044	0.0023	0.0020
Suecia ¹	-	0.0000	-	-	0.0000	-
<i>Unión Europea-27²</i>	<i>0.0136</i>	<i>0.0012</i>	<i>0.0123</i>	<i>0.0073</i>	<i>-0.0012</i>	<i>0.0085</i>

Tabla 2 (continuación)

	Eco-comportamiento en óxido nitroso (N ₂ O)			Eco-comportamiento en metano (CH ₄)		
	Indicador <i>Luenberger</i> de cambio en eco-comportamiento (LEPCh)	Cambio en eco-eficiencia (EEffCh)	Cambio técnico (TechCh)	Indicador <i>Luenberger</i> de cambio en eco-comportamiento (LEPCh)	Cambio en eco-eficiencia (EEffCh)	Cambio técnico (TechCh)
Alemania	0.0366	0.0102	0.0264	0.0354	0.0119	0.0235
Austria	0.0307	-0.0012	0.0319	0.0299	0.0035	0.0264
Bélgica	0.0241	0.0034	0.0208	0.0255	0.0012	0.0243
Bulgaria	0.0022	0.0008	0.0013	0.0017	0.0006	0.0011
Chipre	0.0099	0.0005	0.0095	-0.0014	-0.0046	0.0032
Dinamarca	0.0274	0.0053	0.0222	0.0162	-0.0096	0.0258
Eslovenia	0.0068	-0.0015	0.0083	0.0054	-0.0027	0.0081
España	0.0132	-0.0049	0.0181	0.0035	-0.0121	0.0156
Estonia	0.0040	0.0013	0.0028	0.0056	0.0009	0.0047
Finlandia	0.0186	0.0018	0.0168	0.0209	0.0014	0.0196
Francia	0.0205	0.0024	0.0181	0.0091	-0.0100	0.0191
Grecia	0.0086	0.0011	0.0075	0.0071	-0.0032	0.0104
Holanda	0.0380	0.0159	0.0220	0.0200	0.0034	0.0166
Hungría	0.0038	0.0008	0.0030	0.0033	-0.0010	0.0043
Irlanda	0.0178	0.0074	0.0104	0.0093	0.0029	0.0064
Italia	0.0212	-0.0069	0.0281	0.0111	-0.0130	0.0240
Letonia	0.0036	0.0005	0.0031	0.0044	0.0006	0.0038
Lituania	0.0024	0.0003	0.0021	0.0030	-0.0001	0.0031
Luxemburgo ¹	-	0.0003	-	-	0.0002	-
Malta ¹	-	0.0000	-	-	0.0000	-
Polonia	0.0045	0.0016	0.0028	0.0053	0.0017	0.0036
Portugal	0.0123	-0.0054	0.0178	0.0023	-0.0060	0.0083
Reino Unido ¹	0.0577	0.0240	0.0305	0.0507	0.0281	0.0147
República Checa	0.0050	0.0012	0.0037	0.0058	0.0013	0.0044
República Eslovaca	0.0065	0.0025	0.0041	0.0087	-0.0017	0.0105
Rumania	0.0021	0.0004	0.0017	0.0016	0.0003	0.0013
Suecia ¹	-	0.0000	-	-	0.0000	-
<i>Unión Europea-27</i> ²	<i>0.0139</i>	<i>0.0016</i>	<i>0.0123</i>	<i>0.0102</i>	<i>-0.0015</i>	<i>0.0116</i>

¹ Debido a problemas de no viabilidad en los resultados no se han calculado los promedios de cambio técnico y cambio en el eco-comportamiento para Luxemburgo, Malta y Suecia; además, en el caso de Reino Unido, los promedios se calculan utilizando las tasas de variación de 17 años en el caso de GHG, N₂O y CH₄, y 15 para CO₂.

² Los promedios para la Unión Europea-27 se han calculado excluyendo Luxemburgo, Malta, Suecia y el Reino Unido.

Tabla 3
Eco-eficiencia en las emisiones de GEI en la Unión Europea-27

	Promedio 1990-92				Promedio 2008-10			
	GHG	CO ₂	N ₂ O	CH ₄	GHG	CO ₂	N ₂ O	CH ₄
Alemania	0.307	0.535	0.463	0.443	0.264	0.579	0.403	0.284
Austria	0.090	0.267	0.128	0.336	0.154	0.474	0.213	0.317
Bélgica	0.305	0.545	0.532	0.317	0.314	0.612	0.457	0.329
Bulgaria	0.942	0.944	0.972	0.974	0.912	0.933	0.955	0.961
Chipre	0.466	0.646	0.702	0.809	0.469	0.753	0.668	0.906
Dinamarca	0.266	0.375	0.546	0.268	0.360	0.419	0.446	0.463
Eslovenia	0.552	0.686	0.757	0.744	0.547	0.734	0.749	0.779
España	0.348	0.448	0.475	0.406	0.433	0.603	0.578	0.649
Estonia	0.891	0.951	0.954	0.892	0.848	0.916	0.917	0.863
Finlandia	0.443	0.511	0.601	0.472	0.406	0.585	0.583	0.423
Francia	0.223	0.223	0.538	0.378	0.354	0.354	0.514	0.587
Grecia	0.602	0.654	0.803	0.658	0.569	0.744	0.763	0.725
Holanda	0.435	0.490	0.580	0.606	0.161	0.466	0.248	0.557
Hungría	0.812	0.826	0.914	0.871	0.809	0.818	0.909	0.886
Irlanda	0.564	0.564	0.857	0.873	0.509	0.509	0.701	0.817
Italia	0.092	0.284	0.137	0.220	0.209	0.556	0.303	0.482
Letonia	0.856	0.856	0.951	0.914	0.748	0.748	0.922	0.884
Lituania	0.869	0.869	0.952	0.907	0.780	0.780	0.952	0.904
Luxemburgo	0.001	0.209	0.002	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000
Malta	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Polonia	0.873	0.912	0.931	0.911	0.820	0.874	0.907	0.882
Portugal	0.356	0.446	0.483	0.694	0.462	0.628	0.619	0.819
Reino Unido	0.348	0.462	0.480	0.596	0.012	0.051	0.017	0.109
Republica Checa	0.842	0.903	0.909	0.890	0.795	0.886	0.885	0.864
República Eslovaca	0.792	0.870	0.905	0.798	0.730	0.802	0.862	0.824
Rumanía	0.910	0.929	0.954	0.962	0.888	0.897	0.946	0.958
Suecia	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
<i>Promedio UE-27</i> ¹	<i>0.488</i>	<i>0.571</i>	<i>0.612</i>	<i>0.590</i>	<i>0.465</i>	<i>0.582</i>	<i>0.575</i>	<i>0.603</i>

¹ Los promedios de la Unión Europea-27 se han calculado como media aritmética de todos los países.