



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Facultad de Ciencias Experimentales

Trabajo Fin de Grado

**Medida de la eficiencia
ambiental en los países de
la Unión Europea mediante
el Método DEA durante el
período 2005-2012**

Alumno: Míriam García Alguacil

Junio, 2018



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Facultad de Ciencias Experimentales

Trabajo Fin de Grado

**Medida de la eficiencia
ambiental en los países de
la Unión Europea mediante
el Método DEA durante el
período 2005-2012**

Alumno: **Míriam García Alguacil**

Junio, 2018

ÍNDICE

1. Resumen.....	pág. 1
2. Abstract.....	pág. 1
Keywords.....	pág. 1
3. Introducción, estado del arte y objetivos.....	pág. 2
4. Metodología.....	pág. 5
4.1. Método 1.....	pág. 8
4.2. Método 2.....	pág. 9
5. Resultados.....	pág. 9
5.1. Método 1.....	pág. 9
5.2. Método 2.....	pág. 11
6. Discusión de resultados.....	pág. 13
6.1. Estudio estadístico de los datos de inputs y outputs.....	pág. 13
6.2. Comparación entre el Método 1 y el Método 2.....	pág. 15
6.3. Establecimiento de categorías en función de los valores de eficiencia ambiental relativa.....	pág. 18
6.4. Evolución de la eficiencia ambiental para los distintos países.....	pág. 24
6.5. Evolución temporal de la eficiencia ambiental.....	pág. 35
6.6. Obtención de valores medios entre el Método 1 y el Método 2.....	pág. 36
6.7. Método de Análisis Mejorado (MAM).....	pág. 38
7. Conclusiones.....	pág. 41

8. Anexos.....	pág. 43
8.1. Anexo I: Cálculo de la eficiencia ambiental relativa con DEA en Excel (Método 1) utilizando la herramienta Solver.....	pág. 43
8.2. Anexo II: Cálculo de la eficiencia ambiental relativa con DEA en Excel (Método 2) utilizando la herramienta Solver.....	pág. 45
9. Bibliografía.....	pág. 47

1. RESUMEN

En los últimos años ha crecido el interés por medir la eficiencia ambiental de los distintos territorios, países y/o naciones. Ello ha llevado al desarrollo de distintos métodos para su evaluación como el método de Análisis de Envoltura de Datos (DEA, Data Envelopment Analysis), con el cual se puede medir la eficiencia ambiental relativa y que ha tomado importancia recientemente en el ámbito medioambiental. Utilizando dos opciones de cálculo dentro del método DEA se obtienen los datos de eficiencia ambiental para los 28 países de la Unión Europea para establecer comparaciones entre países y proponer posibles soluciones así como comparar las dos opciones de cálculo del método DEA empleadas. Se muestra que hay 14 de los 28 países que tienen una eficiencia ambiental relativa alta. Sin embargo, también encontramos países con una eficiencia ambiental muy baja y que deberían mejorar en los próximos años.

2. ABSTRACT

In recent years, the interest in measuring the environmental efficiency of different territories, countries or nations has grown. This has led to the development of different methods for its evaluations, such as the Data Envelopment Analysis (DEA) that can be used to calculate relative environmental efficiency and that has recently become important in the field of environmental assessment. We use two options of calculation in the DEA method to calculate the environmental efficiency of the 28 countries of the European Union to compare values between countries and to propose possible solutions and to compare the two options of calculation that we use. There are 14 of the 28 countries that have high relative environmental efficiency values. Nevertheless, we find countries that have very low environmental efficiency values and they should improve their situation in the next years.

Keywords: DEA method, environmental efficiency, Sustainable Development, undesirable outputs, CO₂ emissions, economy.

3. INTRODUCCIÓN, ESTADO DEL ARTE Y OBJETIVOS

En los últimos años ha tomado mucha fuerza la concienciación ambiental debido a ciertos problemas que están haciéndose patentes y que tienen consecuencias sobre el medio ambiente, como son el aumento progresivo de la población, lo que conlleva un mayor uso de recursos y el posible agotamiento de los mismos, además de gran generación de residuos, contaminación del aire, del agua, sequías, inundaciones, y sobretodo el cambio climático (Hansen et al., 2007). Todo esto necesita un cambio a escala global para poder controlar estas cuestiones y reducirlas, si es posible. (Chesney-Lawrence, 2012).

En este sentido, es muy importante el concepto de desarrollo sostenible como se definió por primera vez en 1987 en el Informe Brundtland que implica “satisfacer las necesidades de la generación presente pero sin comprometer las necesidades de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades” (Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, 1987). Posteriormente se han llevado a cabo cumbres en las que se ha desarrollado este concepto de desarrollo sostenible como la Cumbre de la Tierra de Río de Janeiro en 1992 en la que se establece como objetivo el compromiso internacional hacia el desarrollo sostenible (Conferencia de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y el Desarrollo, 1992), el Protocolo de Kioto para la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático (CMNUCC), 1997) hasta llegar al Acuerdo de París en 2015 que en su artículo 2 define su principal objetivo como “reforzar la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, en el contexto del desarrollo sostenible y de los esfuerzos por erradicar la pobreza” (CMNUCC, 2015). Relacionado con el concepto de desarrollo sostenible se han desarrollado conceptos como el de eficiencia energética o ecoeficiencia.

El World Business Council for Sustainable Development, WBCSD (Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible) en el año 1992 define ecoeficiencia como “proporcionar bienes y servicios a un precio competitivo, satisfaciendo las necesidades humanas y la calidad de vida, al tiempo que se reduce progresivamente el impacto ambiental y la intensidad de la utilización de recursos a lo largo del ciclo de

vida, hasta un nivel compatible con la capacidad estimada que puede soportar el Planeta” (World Business Council for Sustainable Development, 1992).

Asimismo, los países de la Unión Europea tienen establecidos unos objetivos como son el crecimiento verde (“el “crecimiento verde” implica el desarrollo de políticas integradas que promuevan un marco medioambiental sostenible”) (Unión Europea, 2014), proteger la naturaleza, favorecer un desarrollo sostenible basado en un crecimiento económico sostenible y en la protección del medio ambiente, entre otras cuestiones, además del objetivo 20 20 20 (20% reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, 20% de energías renovables y 20% de la mejora de la eficiencia ambiental, para conseguir estos objetivos antes de 2020) (Unión Europea, 2007).

Medir la ecoeficiencia no es fácil y depende de muchos factores. Sin embargo, se pueden obtener datos de eficiencia ambiental mediante el método DEA (Data Envelopment Analysis) Análisis Envolverte de Datos. (Peng et al., 2006).

El método DEA, que fue desarrollado por A. Charnes, W.W. Cooper y E. Rhodes en 1978 (Charnes et al., 1978), es un método que se utiliza para calcular la eficiencia relativa de distintas unidades a las que se denominan DMUs (unidades de toma de decisiones, “decision making units”). Para ello, se basan en la existencia de determinadas variables de entrada (inputs) que dan lugar a determinadas variables de salida (outputs). Ambos, inputs y outputs, son comunes en las distintas unidades de toma de decisiones y se les asignan unos determinados pesos.

Charnes et al. en 1978 propusieron un método para calcular la eficiencia técnica mediante la resolución de un problema de programación no lineal. Considerando que tenemos n DMUs denotados como $j = (1, 2, \dots, n)$ y para cada DMU contamos con m inputs x_{ij} ($i=1, 2, \dots, m$) y s outputs y_{rj} ($r=1, 2, \dots, s$), ese problema de programación no lineal se puede expresar de la siguiente forma (Cook & Seiford, 2008):

$$\begin{aligned} e_0 &= \text{máx } \sum_r u_r y_{r0} / \sum_i v_i x_{i0} \\ \text{s.t. } \sum_r u_r y_{rj} - \sum_i v_i x_{ij} &\leq 0 \\ u_r, v_i &\geq \varepsilon \end{aligned} \quad (1)$$

Siendo x_{io} los inputs, y_{ro} los outputs, j el conjunto de unidades de toma de decisiones, r el número de outputs, i el número de inputs, u_r , y v_i los pesos asignados a los outputs y a los inputs, respectivamente y ε es un parámetro para forzar que las variables sean positivas. A este método se le llama CCR por la primera letra de los nombres de sus ideadores (Charnes, Cooper y Rhodes) y también se le conoce como el método CRS (*constant returns to scale*) (Cook & Seiford, 2008)

Sin embargo, este problema de programación no lineal puede ser traducido a programación lineal de la siguiente forma (Cook & Seiford, 2008):

$$\begin{aligned}
 e_0 = \max \quad & \sum_r \mu_r y_{ro} \\
 \text{s.t.} \quad & \sum_i v_i x_{io} = 1 \\
 & \sum_r \mu_r y_{rj} - \sum_i v_i x_{ij} \leq 0 \\
 & \mu_r, v_i \geq \varepsilon
 \end{aligned} \tag{2}$$

Donde $\mu_r = t u_r$, y $v_i = t v_i$, siendo $t = (\sum_i v_i x_{io})^{-1}$.

Después del desarrollo del modelo CRS, surgieron otros como:

- VRS (*variable returns to scale*) (Banker et al., 1984)
- el método aditivo (*the additive model*) (Charnes et al., 1985)
- medidas basadas en holguras (*slacks-based measures*) (Green et al., 1997)
- la medida de Russel (*The Russel measure*) (Fare & Lovell en 1978 y revisada por Pastor et al., 1999)
- y otros modelos no radiales, como el RAM (*Range Adjusted Measure*) (Cooper et al., 1999)

El método DEA tiene numerosas aplicaciones para el cálculo de la eficiencia y desde su desarrollo ha sido ampliamente utilizado, cobrando mayor importancia en los últimos años. Este método puede ser utilizado en distintos campos (como la ingeniería, industria, economía) (Meilin et al., 2017) y también puede ser utilizado para calcular la eficiencia ambiental (Zhang et al., 2018). En el método basado en DEA para el cálculo de la eficiencia ambiental, las variables de salida u outputs se van a dividir en outputs deseables (que nos interesa que sean elevados, por ejemplo, la renta per

cápita) y outputs indeseables (que nos conviene que sean lo más bajos posible para conseguir mayor eficiencia, por ejemplo, contaminantes).

El objetivo de nuestro estudio es el cálculo de la eficiencia ambiental de los 28 países miembros de la Unión Europea actualmente mediante el método DEA durante varios años para estudiar el progreso en eficiencia ambiental en los distintos países y para hacer comparaciones entre países y clasificarlos en función de su eficiencia ambiental. Asimismo, se van a proponer distintas soluciones o alternativas para mejorar la situación en los distintos países en función de los resultados obtenidos. También vamos a utilizar dos opciones de cálculo dentro del método DEA para comparar los resultados obtenidos.

4. METODOLOGÍA

En nuestro caso de estudio hemos utilizado como unidades de toma de decisiones los 28 países de la Unión Europea. Los datos de los inputs y outputs para calcular la eficiencia ambiental se tomaron de 2005 hasta 2012 por no existir datos publicados más recientes de algunos de los países (países que no actualizan sus datos con mucha frecuencia), lo que no nos hizo posible hacer un estudio más reciente.

Los inputs seleccionados han sido la producción de electricidad a partir del carbón, del petróleo y de procedencia nuclear (todos estos datos expresados en porcentajes del total de electricidad producida en cada país), el índice de producción industrial anual (expresado en porcentaje) calculado como la media de los doce índices de producción industrial mensual y el volumen de vehículos (entendido como el número de vehículos que funcionan con combustibles fósiles en uso en cada uno de los países). Estos inputs se muestran en la tabla 1.

En cuanto a los outputs se dividen en outputs deseables que son los que van a contribuir a que ese país tenga mayor eficiencia y los outputs indeseables que son los que le restan eficiencia a ese país. Como outputs deseables se tomaron el PIB y la renta per cápita y como outputs indeseables, las emisiones de CO₂ (dióxido de carbono) y CH₄ (metano). La relación de outputs se muestra en la tabla 1.

INPUTS	OUTPUTS DESEABLES	OUTPUTS INDESEABLES
Producción de electricidad a partir de carbón	PIB	CO ₂
Producción de electricidad a partir de petróleo	Renta per cápita	CH ₄
Producción de electricidad de procedencia nuclear		
Índice de Producción Industrial		
Volumen de vehículos		

Tabla 1.: Relación de inputs, outputs deseables y outputs indeseables seleccionados para nuestro estudio.

Tomando como ejemplo otros estudios realizados con anterioridad, se seleccionaron como outputs indeseables las emisiones de CO₂ (Lundgren & Zhou, 2017) y CH₄ (Pyoungsoo & You-Jin, 2017), porque son gases de efecto invernadero que tienen una gran incidencia sobre el cambio climático y valores mayores de estos indicadores hacen que disminuya la eficiencia ambiental. El PIB (Shih-Heng et al., 2017) y la renta per cápita (Toshiyuki, 2014) son indicadores económicos y que dan cuenta de la situación económica de un país y por lo tanto van a tener mayor eficiencia ambiental cuanto mayores sean estos valores y menores los de emisiones, ya que significaría que las actividades económicas que se realizan son eficientes y se obtienen más beneficios pero con menos emisiones. En cuanto a los inputs que pueden dar lugar tanto a outputs positivos como negativos son la generación de electricidad a partir de carbón y petróleo, la generación de electricidad a partir de fuentes nucleares (Xianhua et al., 2015), el volumen de vehículos y la producción industrial (Chao & Miao, 2017). Cuanto mayores sean estos inputs, mayores serán también los outputs. Sin embargo, se tiene que encontrar un equilibrio porque aunque interesa que el PIB y la renta per cápita (nuestros outputs deseables) sean altos se busca que las emisiones (nuestros outputs indeseables) sean lo más bajas posible para conseguir ser ecoeficientes.

Los datos de PIB, renta per cápita, índice de producción industrial, volumen de vehículos, emisiones de CO₂ se obtuvieron del Instituto Nacional de Estadística de España (INE), el Instituto Nacional de Estadística de Alemania (Statistisches Bundesamt), el Instituto Nacional de Estadística de Francia (INSEE), la Oficina

Europea de Estadística (Eurostat, Statistical Office of the European Communities), el IMF, el Banco Mundial, World Trade Organization, el Banco Central Europeo (European Central Bank), el Banco de España, el Instituto Nacional de Estadísticas de Italia (Istat, L'istituto nazionale di statistica) y el Banco Central de Inglaterra (Bank of England), mientras que los datos de producción de electricidad a partir de petróleo, carbón, de procedencia nuclear y emisiones de CH₄ se extrajeron de la base de datos online del Banco Mundial.

Una vez obtenidos estos datos, se procedió a hacer un estudio estadístico (tomando, para cada indicador, los datos de todos los países y para todos los años de manera conjunta) mediante el cálculo de la media, máximo, mínimo y desviación típica con el objetivo de tener mayor precisión en el proceso final de evaluación. Los valores obtenidos se muestran en la tabla 2.

	INDICADOR	UNIDAD	MÁXIMO	MÍNIMO	MEDIA	DESVIACIÓN TÍPICA
INPUTS	Generación de electricidad a partir de carbón	%	95,709	0	26,918	25,028
	Generación de electricidad a partir de petróleo	%	100	0,016	10,005	25,127
	Generación de electricidad a partir de energía nuclear	%	79,512	0	18,924	23,105
	Índice de producción industrial	%	22,842	-23,442	1,085	7,421
	Volumen de tráfico	Vehículos	49742000	252000	9805492,103	13627526,68
OUTPUTS DESEABLES	PIB	Millones de €	2758260	5142	454236,517	688213,992
	Renta per cápita	€	83100	3100	23768,5803	15550,584
OUTPUTS INDESEABLES	Emisiones de CO ₂	Kts	844435	2432	142200,227	190781,005
	Emisiones de CH ₄ equivalente de CO ₂	Kt de equivalente de CO ₂	83756,9	140,9427	18849,737	22216,665

Tabla 2: Estudio estadístico de inputs y outputs para los 28 países de la UE, 2005-2012. Fuente: elaboración propia

Una vez realizado el estudio estadístico para todos los países en conjunto, se procedió a calcular la eficiencia ambiental para cada uno de los distintos países en los años de estudio. Para el cálculo de la eficiencia se usaron las dos opciones de método DEA tal como se describen en Peng et al., 2006 para hacer la comparación de los dos métodos de la misma manera que en el citado artículo. La descripción teórica de ambos métodos se muestra a continuación.

4.1. Método 1

Asumimos que hay $k=1,2,3,\dots,28$ DMUs (Unidades de Toma de Decisiones, Decision Making Units) que se corresponden con los 28 países de la Unión Europea. Para cada uno de los DMU_k vamos a tener N inputs $x_k=(x_{1k}, x_{2k}, \dots, x_{Nk})$, M outputs deseables $y_k=(y_{1k}, y_{2k}, \dots, y_{Mk})$ y J outputs indeseables $u_k=(u_{1k}, u_{2k}, \dots, u_{Jk})$. Con todos estos datos se procede a operar de la siguiente manera (Tyteca, 1997):

$$\begin{aligned}
 EEI &= \min \lambda \\
 \text{s.t. } & \sum_{k=1}^K z_k x_{nk} \leq x_n, \quad n = 1, 2, \dots, N \\
 & \sum_{k=1}^K z_k y_{mk} \geq y_m, \quad m = 1, 2, \dots, M \\
 & \sum_{k=1}^K z_k u_{jk} = \lambda u_j, \quad j = 1, 2, \dots, J \\
 & z_k \geq 0, \quad k = 1, 2, \dots, K
 \end{aligned} \tag{3}$$

Siendo EEI la eficiencia ambiental (Environmental Efficiency Index); K , el número de DMUs; N , el número de inputs; x , los inputs; y , los outputs deseables; M , el número de outputs deseables; u , los outputs indeseables; J , el número de outputs indeseables; z_k , los pesos asignados a los distintos DMUs y λ , la eficiencia. De esta manera se obtendría EEI para cada uno de los DMU. Los DMU que tengan mayor EEI tendrán una mayor eficiencia ambiental.

Para la realización de estos cálculos se utilizó la herramienta Solver del programa Excel (Anexo I) tomando como modelo un ejemplo recogido en el capítulo 2 de W.D. Cook y Joe Zhu, *Data Envelopment Analysis : Modeling Operational Processes and Measuring Productivity* (Cook & Zhu, 2008) pero modificado para cumplir nuestras necesidades, puesto que en el ejemplo que se tomó como modelo

no se incluían outputs indeseables y también era necesario cambiar las restricciones para que se ajustara al modelo expuesto en la ecuación 3.

Una vez obtenidos los resultados de la eficiencia en los distintos años se procedió a calcular la media de los distintos países. Posteriormente, se procedió al análisis de los datos obtenidos.

4.2. Método 2

En el método que hemos empleado hasta el momento (método 1) se considera que todos los inputs indeseables tienen la misma importancia. Sin embargo, existen otros métodos en los que se les da distinta importancia a los inputs indeseables. Uno de estos métodos es el propuesto por Peng et al. en 2006 (al que a partir de ahora denominaremos método 2) en el que se le asignan distintos pesos a los inputs indeseables en función de su importancia y que se describe de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 EE|_2 = \min \sum_{j=1}^J w_j \lambda_j \\
 \text{s.t. } \sum_{k=1}^K z_k x_{nk} \leq x_n, \quad n=1,2,\dots,N \\
 \sum_{k=1}^K z_k y_{mk} \geq y_m, \quad m=1,2,\dots,M \\
 \sum_{k=1}^K z_k u_{jk} = \lambda_j u_j, \quad j=1,2,\dots,J \\
 z_k \geq 0, \lambda_j \leq 1, \quad k=1,2,\dots,K; \quad j=1,2,\dots,J
 \end{aligned} \tag{4}$$

Donde w_j ($j = 1, 2, \dots, J$) son los pesos que se les dan a los inputs indeseables.

Utilizando de nuevo la herramienta Solver de Excel (Anexo II) (Cook & Zhu, 2008), obtenemos los nuevos valores de eficiencia para los 28 países en estos 8 años y se procedió a su interpretación.

5. RESULTADOS

5.1. Método 1

Una vez aplicado el método 1 para medir la eficiencia ambiental se obtuvieron los datos de eficiencia ambiental para los 28 países de la Unión Europea durante los

años del 2005 al 2012. Estos resultados se muestran en la tabla 3. Hay que tener en cuenta que los resultados obtenidos son de eficiencia ambiental relativa, lo que quiere decir que si hay países que tienen eficiencia del 100 % no quiere decir que su eficiencia ambiental sea perfecta, sino que son los más eficientes de entre los países que estamos estudiando.

Método 1	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Alemania	1	1	1	1	1	1	1	1
Austria	1	1	1	1	1	1	1	1
Bélgica	1	1	0,91974	0,90943	1	1	0,91808	0,9181
Bulgaria	0,19318	0,19312	0,18073	0,19388	0,25535	1	0,19434	0,58077
Chipre	1	1	1	1	1	1	1	1
Croacia	0,55502	0,57879	0,51608	0,54401	0,55786	1	1	1
Dinamarca	1	1	1	1	1	1	1	1
Eslovaquia	1	0,34476	0,3937	0,44765	0,4817	0,49112	0,45281	0,43873
Eslovenia	0,64194	0,62028	0,6022	0,57549	0,69106	1	0,80081	0,6149
España	0,78143	0,78112	0,77369	0,84181	1	1	0,81044	1
Estonia	0,63667	0,68943	0,53955	0,57273	1	0,5902	0,56159	1
Finlandia	1	0,56014	0,57224	0,61133	0,69907	1	0,58454	0,55831
Francia	1	1	1	1	1	1	1	1
Grecia	1	1	1	1	1	1	1	0,54241
Hungría	0,39984	0,38055	0,40296	0,42662	0,49486	0,39354	0,36761	0,34726
Irlanda	1	1	1	1	1	1	1	1
Italia	1	1	1	1	1	1	1	1
Letonia	1	1	1	1	1	1	1	1
Lituania	1	1	0,63402	1	1	1	1	1
Luxemburgo	1	1	1	1	1	1	1	1
Malta	1	1	1	1	1	1	1	1
Países Bajos	1	1	1	1	1	1	1	1
Polonia	1	1	1	1	1	1	1	1
Portugal	0,59589	1	1	1	0,70056	1	1	1
Reino Unido	1	1	1	1	1	1	1	1
República Checa	0,28101	0,29438	0,30624	0,3564	0,35152	0,38802	0,33825	0,3137
Rumanía	1	0,20547	0,22566	0,23233	0,30254	1	0,23183	0,22111
Suecia	1	1	1	1	1	1	1	1

Tabla 3: Datos de eficiencia ambiental para los 28 países de la Unión Europea durante el período 2005-2012 obtenidos con el método DEA 1. Fuente: elaboración propia.

Posteriormente, se procedió al cálculo de la media de los valores de eficiencia ambiental para cada uno de los 28 países durante los 8 años de estudio (2005-2012). Los resultados se muestran en la tabla 4.

	MÉTODO 1
Alemania	1
Austria	1
Bélgica	0,95817
Bulgaria	0,34892
Chipre	1
Croacia	0,71897
Dinamarca	1
Eslovaquia	0,50631
Eslovenia	0,69333
España	0,87356
Estonia	0,69877
Finlandia	0,6982
Francia	1
Grecia	0,9428
Hungría	0,40165
Irlanda	1
Italia	1
Letonia	1
Lituania	0,95425
Luxemburgo	1
Malta	1
Países Bajos	1
Polonia	1
Portugal	0,91205
Reino Unido	1
República Checa	0,32869
Rumanía	0,42737
Suecia	1

Tabla 4: Datos de eficiencia ambiental media para los 28 países de la Unión Europea en el período 2005-2012 obtenidos con el método DEA 1. Fuente: elaboración propia

5.2. Método 2

Una vez aplicado el método 1 y obtenidos los datos para este método se pasa al cálculo de las eficiencias ambientales empleando en este caso el método 2 para la posterior comparación de los dos métodos. El método 2 se diferencia del 1 en que se

les da distinto peso a los inputs indeseables. En nuestro caso, le damos un valor de 1 al CO₂ y un valor de 35 al CH₄ debido a que el CH₄ contribuye 35 veces más que el CO₂ en el calentamiento global (Claver et al., 2011). Los resultados de eficiencia con el método 2 se encuentran en la tabla 5.

Método 2	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Alemania	1	1	1	1	1	1	1	1
Austria	1	1	1	1	1	1	1	1
Bélgica	0,98893	0,95715	0,8916	0,87118	0,94409	0,88882	0,8871	0,88412
Bulgaria	0,08567	0,08791	0,09166	0,09607	0,16249	1	0,10569	0,10154
Chipre	0,91388	1	0,92983	0,97352	1	1	1	1
Croacia	0,27692	0,26546	0,26547	0,28589	0,29653	1	1	0,38745
Dinamarca	1	1	1	1	1	1	1	1
Eslovaquia	1	0,33362	0,38596	0,44111	0,47296	0,49098	0,44371	0,42889
Eslovenia	0,36179	0,36746	0,38247	0,39883	0,57175	1	0,43572	0,42127
España	0,74073	0,70968	0,71636	0,70626	1	1	0,64551	1
Estonia	0,48067	0,48782	0,49582	0,50994	1	0,53298	0,54701	0,51749
Finlandia	1	0,5064	0,49674	0,50087	0,68142	1	0,54721	0,51542
Francia	1	1	1	1	1	1	1	1
Grecia	1	1	0,68915	0,7002	0,70334	1	1	0,52688
Hungría	0,34526	0,3281	0,35654	0,37236	0,49103	0,35305	0,34391	0,32601
Irlanda	0,43603	1	1	0,41988	0,39115	0,37938	1	0,35505
Italia	1	1	1	1	1	1	1	1
Letonia	0,3715	0,36776	0,37698	0,3866	1	1	1	1
Lituania	0,22283	0,2231	0,22836	0,22883	0,25729	1	0,25265	0,24597
Luxemburgo	1	1	1	1	1	1	1	1
Malta	1	1	1	1	1	1	1	1
Países Bajos	1	1	1	1	1	1	1	1
Polonia	1	1	1	1	0,12434	0,13739	0,13727	1
Portugal	0,34108	1	0,42332	0,34787	0,36575	0,54239	0,47781	1
Reino Unido	1	1	1	1	1	1	1	1
República Checa	0,26539	0,27826	0,29203	0,33118	0,33438	0,37275	0,32031	0,2987
Rumanía	1	1	0,12978	0,14137	0,13375	0,18142	0,12784	0,1234
Suecia	1	1	1	1	1	1	1	1

Tabla 5: Valores de eficiencia ambiental para los 28 países de la Unión Europea (2005-2012) obtenidos con el método 2. Fuente: elaboración propia.

También se obtuvieron los valores de eficiencia ambiental media de cada uno de los países con los datos obtenidos con el método 2. Los resultados se muestran en la tabla 6.

	MÉTODO 2
Alemania	1
Austria	1
Bélgica	0,91412
Bulgaria	0,21638
Chipre	0,97715
Croacia	0,47221
Dinamarca	1
Eslovaquia	0,49965
Eslovenia	0,49241
España	0,81481
Estonia	0,57147
Finlandia	0,65601
Francia	1
Grecia	0,82744
Hungría	0,36453
Irlanda	0,62268
Italia	1
Letonia	0,68785
Lituania	0,33238
Luxemburgo	1
Malta	1
Países Bajos	1
Polonia	0,67487
Portugal	0,56228
Reino Unido	1
República Checa	0,31162
Rumanía	0,35469
Suecia	1

Tabla 6: Datos de eficiencia ambiental media para los 28 países de la Unión Europea en el período 2005-2012 obtenidos con el método DEA 2. Fuente: elaboración propia

6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1. Estudio estadístico de los datos de inputs y outputs

Una vez obtenidos los datos del análisis estadístico, que se hizo de manera conjunta con todos los datos de inputs y outputs para los 28 países y en los años seleccionados, se pasó a analizar los resultados del análisis.

En cuanto a la generación de electricidad a partir de carbón, el valor máximo se alcanza en Estonia en el año 2007 mientras que el valor más bajo se repite en distintos países durante varios años, como por ejemplo en Malta, Chipre, Letonia y Luxemburgo durante los años 2005 y 2006, entre otros.

Para la generación de electricidad a partir de petróleo, el valor más alto se alcanza en Malta durante varios años como por ejemplo, en el año 2005 o en el 2008. El valor más bajo se alcanza en Letonia en 2012.

En la generación de electricidad a partir de energía nuclear, tenemos que el valor más alto se alcanza en 2011 en Francia. En cuanto al valor mínimo, éste se alcanza en varias ocasiones en varios países aunque suelen repetirse. Por ejemplo, ese valor se alcanza en Austria, Chipre, Croacia, Dinamarca, Estonia, Grecia, Irlanda, Italia, Letonia, Luxemburgo, Malta, Polonia y Portugal en el año 2007 y en el 2008, entre otros.

El valor máximo de índice de producción industrial se da en 2010 en Estonia. Sin embargo, el valor más bajo se alcanzó también en Estonia en 2009.

En cuanto al volumen de vehículos, el valor máximo se encuentra en Alemania en 2006 y el valor más bajo en Malta en el año 2005.

Para el PIB, el valor más alto se alcanza en 2012 en Alemania. El valor más bajo se alcanza en Malta en el año 2005.

En la renta per cápita, el valor más alto se alcanza en Luxemburgo en el año 2011 mientras que el valor más bajo se alcanza en 2005 en Bulgaria.

En las emisiones de dióxido de carbono, el valor más alto se encuentra en el año 2006 en Alemania y el valor más bajo en Luxemburgo en el año 2012.

Para las emisiones de metano, el valor más alto se alcanzó en el año 2010 en Francia. Sin embargo, el valor más bajo se alcanzó en Luxemburgo en el año 2012.

6.2. Comparación entre el Método 1 y el Método 2

Una vez que tenemos los datos de eficiencia ambiental relativa obtenidos por cada uno de los dos métodos pasamos a comparar los resultados obtenidos. Los datos se muestran en la tabla 7 y en la tabla 8.

	2005		2006		2007		2008	
	Método 1	Método 2	Método 1	Método 2	Método 1	Método 2	Método 1	Método 2
Alemania	1	1	1	1	1	1	1	1
Austria	1	1	1	1	1	1	1	1
Bélgica	1	0,98893	1	0,95715	0,91974	0,8916	0,90943	0,87118
Bulgaria	0,19318	0,08567	0,19312	0,08791	0,18073	0,09166	0,19388	0,09607
Chipre	1	0,91388	1	1	1	0,92983	1	0,97352
Croacia	0,55502	0,27692	0,57879	0,26546	0,51608	0,26547	0,54401	0,28589
Dinamarca	1	1	1	1	1	1	1	1
Eslovaquia	1	1	0,34476	0,33362	0,3937	0,38596	0,44765	0,44111
Eslovenia	0,64194	0,36179	0,62028	0,36746	0,6022	0,38247	0,57549	0,39883
España	0,78143	0,74073	0,78112	0,70968	0,77369	0,71636	0,84181	0,70626
Estonia	0,63667	0,48067	0,68943	0,48782	0,53955	0,49582	0,57273	0,50994
Finlandia	1	1	0,56014	0,5064	0,57224	0,49674	0,61133	0,50087
Francia	1	1	1	1	1	1	1	1
Grecia	1	1	1	1	1	0,68915	1	0,7002
Hungría	0,39984	0,34526	0,38055	0,3281	0,40296	0,35654	0,42662	0,37236
Irlanda	1	0,43603	1	1	1	1	1	0,41988
Italia	1	1	1	1	1	1	1	1
Letonia	1	0,3715	1	0,36776	1	0,37698	1	0,3866
Lituania	1	0,22283	1	0,2231	0,63402	0,22836	1	0,22883
Luxemburgo	1	1	1	1	1	1	1	1
Malta	1	1	1	1	1	1	1	1
Países Bajos	1	1	1	1	1	1	1	1
Polonia	1	1	1	1	1	1	1	1
Portugal	0,59589	0,34108	1	1	1	0,42332	1	0,34787
Reino Unido	1	1	1	1	1	1	1	1
República Checa	0,28101	0,26539	0,29438	0,27826	0,30624	0,29203	0,3564	0,33118
Rumanía	1	1	0,20547	1	0,22566	0,12978	0,23233	0,14137
Suecia	1	1	1	1	1	1	1	1

Tabla 7: Comparación de las eficiencias ambientales con el método 1 y con el método 2 para los 28 países de la Unión Europea en el período 2005-2008. Fuente: elaboración propia

	2009		2010		2011		2012	
	Método	Método	Método	Método	Método	Método	Método	Método
	1	2	1	2	1	2	1	2
Alemania	1	1	1	1	1	1	1	1
Austria	1	1	1	1	1	1	1	1
Bélgica	1	0,94409	1	0,88882	0,91808	0,8871	0,90943	0,88412
Bulgaria	0,25535	0,16249	1	1	0,19434	0,10569	0,19388	0,10154
Chipre	1	1	1	1	1	1	1	1
Croacia	0,55786	0,29653	1	1	1	1	0,54401	0,38745
Dinamarca	1	1	1	1	1	1	1	1
Eslovaquia	0,4817	0,47296	0,49112	0,49098	0,45281	0,44371	0,44765	0,42889
Eslovenia	0,69106	0,57175	1	1	0,80081	0,43572	0,57549	0,42127
España	1	1	1	1	0,81044	0,64551	0,84181	1
Estonia	1	1	0,5902	0,53298	0,56159	0,54701	0,57273	0,51749
Finlandia	0,69907	0,68142	1	1	0,58454	0,54721	0,61133	0,51542
Francia	1	1	1	1	1	1	1	1
Grecia	1	0,70334	1	1	1	1	1	0,52688
Hungría	0,49486	0,49103	0,39354	0,35305	0,36761	0,34391	0,42662	0,32601
Irlanda	1	0,39115	1	0,37938	1	1	1	0,35505
Italia	1	1	1	1	1	1	1	1
Letonia	1	1	1	1	1	1	1	1
Lituania	1	0,25729	1	1	1	0,25265	1	0,24597
Luxemburgo	1	1	1	1	1	1	1	1
Malta	1	1	1	1	1	1	1	1
Países Bajos	1	1	1	1	1	1	1	1
Polonia	1	0,12434	1	0,13739	1	0,13727	1	1
Portugal	0,70056	0,36575	1	0,54239	1	0,47781	1	1
Reino Unido	1	1	1	1	1	1	1	1
República Checa	0,35152	0,33438	0,38802	0,37275	0,33825	0,32031	0,3564	0,2987
Rumanía	0,30254	0,13375	1	0,18142	0,23183	0,12784	0,23233	0,1234
Suecia	1	1	1	1	1	1	1	1

Tabla 8: Comparación de las eficiencias ambientales con el método 1 y con el método 2 para los 28 países de la Unión Europea en el período 2009-2012. Fuente: elaboración propia.

Por regla general, con el método 2 los valores de eficiencia suelen salir más bajos que en el método 1 ya que al darle mayor peso a las emisiones de metano, países que tenían unas emisiones de metano altas pero las de CO₂ bajas pasan a tener menos eficiencia al darle más importancia a las emisiones de metano, llegando en algunos casos a bajar mucho la eficiencia (por ejemplo, en el caso de Irlanda en el que su eficiencia para el 2005 en el método 1 es de 1 y en el método 2 es de 0,436).

Posteriormente, se procedió a comparar los valores de eficiencia ambiental media obtenidos para cada uno de los dos métodos. Los resultados se muestran en la tabla 9.

	MÉTODO 1	MÉTODO 2
Alemania	1	1
Austria	1	1
Bélgica	0,95817	0,91412
Bulgaria	0,34892	0,21638
Chipre	1	0,97715
Croacia	0,71897	0,47221
Dinamarca	1	1
Eslovaquia	0,50631	0,49965
Eslovenia	0,69333	0,49241
España	0,87356	0,81481
Estonia	0,69877	0,57147
Finlandia	0,6982	0,65601
Francia	1	1
Grecia	0,9428	0,82744
Hungría	0,40165	0,36453
Irlanda	1	0,62268
Italia	1	1
Letonia	1	0,68785
Lituania	0,95425	0,33238
Luxemburgo	1	1
Malta	1	1
Países Bajos	1	1
Polonia	1	0,67487
Portugal	0,91205	0,56228
Reino Unido	1	1
República Checa	0,32869	0,31162
Rumanía	0,42737	0,35469
Suecia	1	1

Tabla 9. Valores de eficiencia ambiental media con el método 2 y con el método 1 para los 28 países de la Unión Europea en el período 2005-2012. Fuente: elaboración propia.

Como ya se había visto antes en los valores absolutos, en los valores medios para los distintos países también se puede comprobar como los valores de eficiencia ambiental media suelen salir más bajos con el método 2 al darle mayor importancia al metano que al dióxido de carbono en los inputs indeseables.

6.3. Establecimiento de categorías en función de los valores de eficiencia ambiental relativa

A la vista de los valores de eficiencia ambiental media, se establecieron cuatro categorías:

- Eficiencia ambiental excelente: para aquellos países con una media entre 0,9999 y 1 y que se representó con el color verde.
- Eficiencia ambiental buena: para aquellos países con una media entre 0,8 y 0,9999 y que se representan con el color amarillo.
- Eficiencia ambiental media: para aquellos países con una media entre 0,5 y 0,79 y que se representan con el color naranja.
- Eficiencia ambiental mejorable: para aquellos países con una media entre 0 y 0,49 y que se representan con el color rojo.

Teniendo en cuenta los valores de eficiencia ambiental relativa media obtenidos con el Método 1, se reparten los países en las categorías establecidas anteriormente. Los resultados se muestran en la figura 1.

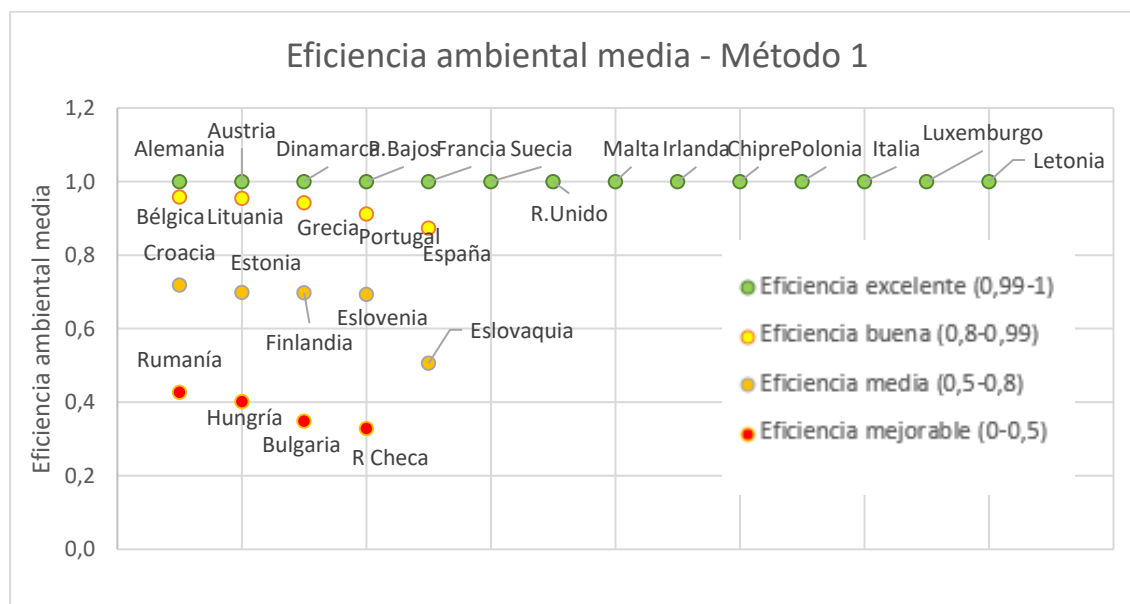


Figura 1: Eficiencia ambiental media de los 28 países de la Unión Europea obtenidos con el método DEA 1 clasificados por categorías. Fuente: elaboración propia.

De esta manera, según los datos obtenidos con el Método 1, los 28 países de la Unión Europea se reparten en las distintas categorías de la siguiente forma:

- 14 países se encuentran dentro de la categoría “Eficiencia ambiental excelente” y son Alemania, Austria, Chipre, Dinamarca, Francia, Irlanda, Italia, Letonia, Luxemburgo, Malta, Países Bajos, Polonia, Reino Unido y Suecia.
- 5 países se encuentran en la categoría de “Eficiencia ambiental buena” y son Bélgica, España, Grecia, Lituania y Portugal.
- 5 países se encuentran en la categoría de “Eficiencia ambiental media” y son Croacia, Eslovaquia, Eslovenia, Estonia y Finlandia.
- Los 4 países restantes se encuentran dentro de la categoría de “Eficiencia ambiental mejorable” y son Bulgaria, Hungría, República Checa y Rumanía.

Los países con la eficiencia ambiental media más alta son Alemania, Dinamarca y Austria, mientras que los países con la eficiencia ambiental media menor son Hungría, Bulgaria y República Checa.

A continuación, se procedió a volver a clasificar los 28 países de la Unión Europea por categorías, pero esta vez en función de los datos obtenidos con el Método 2. Los resultados se muestran en la figura 2.

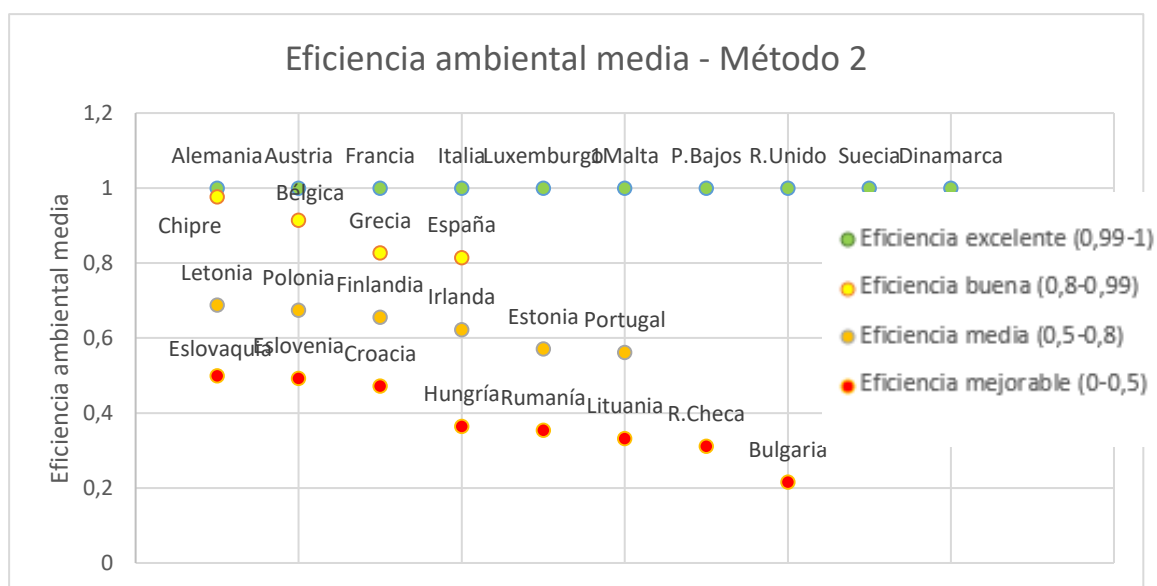


Figura 2: Eficiencia ambiental media de los 28 países de la Unión Europea obtenidos con el método DEA 2 clasificados por categorías. Fuente: elaboración propia.

Comparando datos de las eficiencias ambientales medias con los dos métodos tenemos países que se encuentran en la misma categoría para los dos métodos: España, Francia, Italia, Malta, Grecia, Austria, Alemania, Luxemburgo, Bélgica, Países Bajos, Dinamarca, Reino Unido, Suecia, Finlandia, Estonia, República Checa, Hungría, Rumanía y Bulgaria.

Sin embargo, hay países que sí cambian de categoría:

- Portugal pasa de eficiencia buena en el método 1 a eficiencia media en el método 2.
- Chipre pasa de eficiencia excelente a eficiencia buena.
- Irlanda pasa de eficiencia excelente a eficiencia media.
- Letonia pasa de eficiencia excelente a eficiencia media.
- Lituania pasa de eficiencia buena a eficiencia mejorable.
- Polonia pasa de eficiencia excelente a eficiencia media.
- Eslovaquia pasa de eficiencia media a eficiencia mejorable.
- Eslovenia pasa de eficiencia media a eficiencia mejorable.
- Croacia pasa de eficiencia media a eficiencia mejorable.

Como podemos observar también, se reduce el número de países con una eficiencia muy cercana a 1, es decir, los países con una eficiencia ambiental excelente, y aumenta el número de países con una eficiencia ambiental mejorable. Sin embargo, en los dos métodos se mantienen Alemania y Austria como los dos países con la mayor eficiencia ambiental pero sí varían los últimos puestos ya que mientras que en el método 1 el país con la peor eficiencia es la República Checa, en el método 2 es Bulgaria.

En la tabla 10 se muestran los países ordenados en las distintas categorías en función de su valor de eficiencia ambiental media tanto para el Método 1 como para el Método 2.

MÉTODO 2		MÉTODO 1	
Alemania	1	Alemania	1
Austria	1	Austria	1
Francia	1	Dinamarca	1
Italia	1	Países Bajos	1
Luxemburgo	1	Francia	1
Malta	1	Suecia	1
Países Bajos	1	Reino Unido	1
Reino Unido	1	Malta	1
Suecia	1	Irlanda	1
Dinamarca	1	Chipre	1
Chipre	0,97715	Polonia	1
Bélgica	0,91412	Italia	1
Grecia	0,82744	Luxemburgo	1
España	0,81481	Letonia	1
Letonia	0,68785	Bélgica	0,95817
Polonia	0,67487	Lituania	0,95425
Finlandia	0,65601	Grecia	0,9428
Irlanda	0,62268	Portugal	0,91205
Estonia	0,57147	España	0,87356
Portugal	0,56228	Croacia	0,71897
Eslovaquia	0,49965	Estonia	0,69877
Eslovenia	0,49241	Finlandia	0,6982
Croacia	0,47221	Eslovenia	0,69333
Hungría	0,36453	Eslovaquia	0,50631
Rumanía	0,35469	Rumanía	0,42727
Lituania	0,33238	Hungría	0,40165
República Checa	0,31162	Bulgaria	0,34892
Bulgaria	0,21638	República Checa	0,32869

Tabla 10: Clasificación en categorías en función de la eficiencia ambiental media con los método 1 y 2 para los 28 países de la Unión Europea en el período 2005-2012. Fuente: elaboración propia.

Con el objetivo de sintetizar toda esta información se muestra la figura 3 en la que se muestra una comparación de las eficiencias ambientales medias para el método 1 y para el método 2.

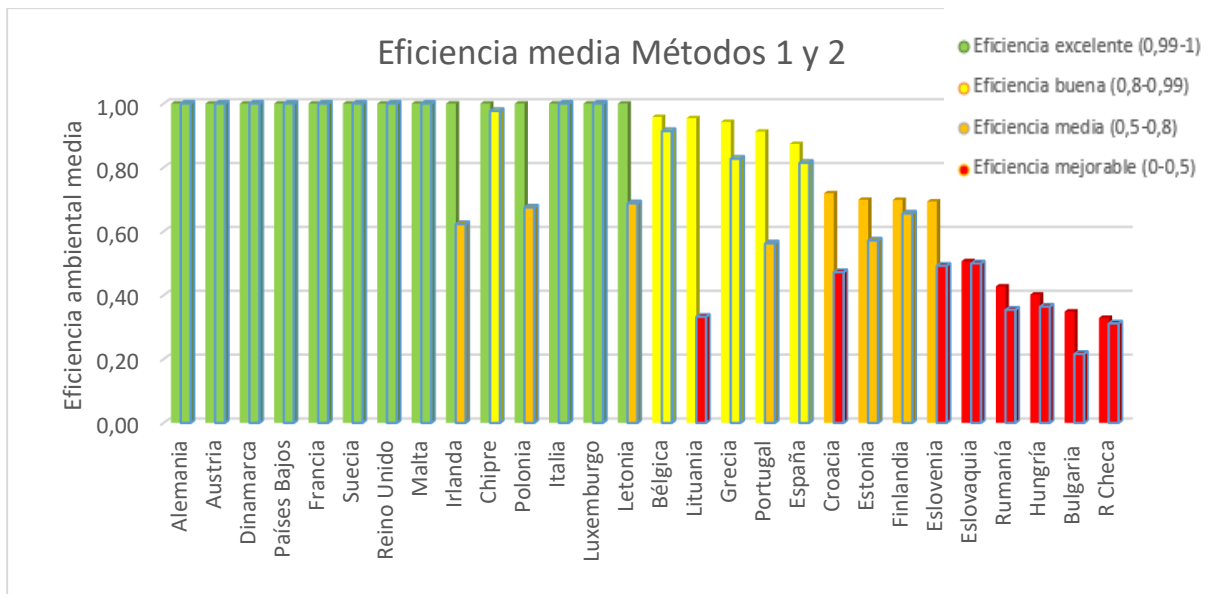


Figura 3: Eficiencias ambientales medias para los 28 países de la Unión Europea (2005-2012) siendo la barra de la izquierda la eficiencia con el método 1 y la barra derecha la eficiencia con el método 2.
Fuente: elaboración propia

Para visualizar mejor toda esta información, se procedió a representar en un mapa de Europa los distintos países con distintos colores en función de la categoría que le pertenece según los datos de eficiencia ambiental media obtenidos con el Método 1. Este mapa se presenta en la figura 4.



Figura 4: Representación de los 28 países de la Unión Europea con un color en función de su eficiencia ambiental obtenida con el método DEA 1. Fuente: elaboración propia.

Viendo la representación gráfica de la figura 4 se puede ver que hay varias tendencias: los países con una eficiencia ambiental media más alta suelen encontrarse en la zona central de Europa; los países con la peor eficiencia ambiental media se encuentran en la parte sureste de Europa; y por último, los países con una eficiencia ambiental media de las categorías de eficiencia ambiental mejorable y media están repartidos por todo el territorio que ocupan los países de la Unión Europea pero también suelen encontrarse en las zonas periféricas.

De la misma manera que para el Método 1, se procedió a elaborar el mismo tipo de mapa pero con los datos de eficiencia ambiental media del Método 2. Los datos se muestran en la figura 5.



Figura 5: Representación de los 28 países de la Unión Europea con un color en función de su eficiencia ambiental con el método 2. Fuente: elaboración propia.

La tendencia es similar a la del Método 1 (los países con eficiencia ambiental media y buena se encuentran en la periferia y los países con eficiencia ambiental excelente se encuentran en la zona central) pero aumenta el número de países con una eficiencia ambiental mejorable que se encuentran en el sureste de Europa.

6.4. Evolución de la eficiencia ambiental para los distintos países

Alemania tiene unos valores de eficiencia muy altos ya que tanto el PIB como la renta per cápita se mantienen bastante altos. Sin embargo, las emisiones también se mantienen bastante altas aunque no llegan a ser las más altas que se observan para el conjunto de países. Si Alemania tuviera unos indicadores económicos peores tendría una eficiencia ambiental baja porque sus emisiones no son bajas. Una solución para Alemania sería reducir sus emisiones. También se observa que casi el 50% de la electricidad que usa Alemania procede del carbón y que el volumen de vehículos

es muy alto. Reduciendo estos dos indicadores, Alemania podría reducir sus emisiones. Otra opción que podría tomar Alemania sería aumentar el número de vehículos eléctricos.

Austria mantiene unos valores de eficiencia ambiental muy cercanos a 1 debido a que sus emisiones no son tan altas como en otros países aunque los indicadores económicos son más bajos que, por ejemplo, Alemania en el caso anterior. A pesar de esto, tiene unos valores de eficiencia ambiental similares a Alemania porque sus emisiones son más bajas ya que menos del 20% de su electricidad procede del carbón y el petróleo y su volumen de vehículos no es tan elevado. Sin embargo, la situación podría mejorar si mejoraran sus indicadores económicos.

Bélgica tiene una eficiencia ambiental muy alta. Sus emisiones no son muy elevadas lo que se debe en parte a que la mayoría de la electricidad que consumen procede de las centrales nucleares y menos del 20% procede del carbón y el petróleo. El número de vehículos es elevado aunque dentro de nuestro estudio hay países con mayor volumen de vehículos, como Alemania. Sus indicadores económicos no son muy altos, pero como las emisiones tampoco lo son, se mantiene una alta eficiencia ambiental. Una posible mejora vendría si se mejoraran el PIB y la renta per cápita.

Bulgaria mantiene una eficiencia ambiental baja salvo en los años 2010 y 2012 en los que la eficiencia ambiental difiere mucho de la tendencia de los otros años. Bulgaria muestra los valores de eficiencia ambiental más bajos que se han registrado en nuestro estudio. Esto puede ser debido a que el PIB y la renta per cápita son muy bajos aunque las emisiones no son muy altas. Sin embargo, el hecho de que los indicadores económicos sean tan bajos es lo que hace que la eficiencia ambiental sea muy baja. También es cierto que las emisiones se podrían reducir ya que hay un gran volumen de vehículos y casi el 50% de la electricidad procede del carbón aunque casi la totalidad de la parte restante procede de centrales nucleares. La solución para Bulgaria sería reducir el uso del carbón para obtener electricidad y mejorar los indicadores económicos.

Chipre tiene unos valores de eficiencia ambiental muy cercanos a 1. Esto se debe a que el PIB y la renta per cápita se mantienen en unos valores medios y a que

las emisiones no son muy altas. Sin embargo, prácticamente el 100% de la electricidad procede del petróleo por lo que sería muy conveniente buscar otras fuentes de energía más sostenibles, como las energías renovables, para mejorar su situación.

Croacia mantiene una eficiencia media pero a partir de 2010 su eficiencia ambiental asciende mucho y se mantiene así en el resto de años del estudio. Croacia muestra esos valores relativamente bajos de eficiencia ambiental debido a que, aunque las emisiones no son demasiado altas, el PIB y la renta per cápita no son de los más elevados que encontramos en los países en estudio. El volumen de vehículos no es excesivamente alto y entre la producción de electricidad a partir del carbón y del petróleo no llegan al 50% por lo que para mejorar su situación debería mejorar su economía y quizás buscar otras fuentes de energía más renovables. A partir de 2010, los valores de eficiencia ambiental están muy cercanos a 1. Esto puede deberse a que los valores de emisiones son más bajos durante estos años así como los de producción de electricidad a partir de petróleo.

Dinamarca muestra siempre unos valores de eficiencia ambiental muy altos. Estos valores se deben a que las emisiones tienen unos valores aceptables además de que los indicadores económicos son correctos aunque no llegan a ser tan altos como en Alemania que es el país que muestra el mejor PIB entre los países que forman nuestro estudio. Sin embargo, la producción de electricidad a partir de carbón es siempre mayor del 34% por lo que quizás se deberían buscar otras fuentes de energía como las renovables.

Eslovaquia mantiene una eficiencia ambiental baja, salvo en el año 2005 en el que la eficiencia ambiental tiene un valor muy distinto de la tendencia seguida. Los valores de emisiones se encuentran por debajo de la media así como la renta per cápita, además el PIB se encuentra muy por debajo de la media, lo que puede ser la razón por la que sus valores de eficiencia no son demasiado altos. Muestra unos valores de producción de electricidad a partir de fuentes nucleares bastante altos (siempre superiores al 50%) y mucho mayores que los procedentes del carbón y del petróleo lo que resulta positivo desde el punto de vista de la reducción de emisiones. Sin embargo, para mejorar su eficiencia debería mejorar su PIB. Además, se podrían

tomar medidas ambientales como aumentar el número de coches eléctricos, cambiar a energías renovables, entre otras medidas.

Eslovenia tiene una eficiencia ambiental mayor en los años 2010 y 2011. Sin embargo, en el resto de años, la eficiencia ambiental se mantiene en unos valores medios. En los años 2010 y 2011, los valores de los indicadores económicos son ligeramente mayores que en el resto de años y las emisiones de CO₂ también se reducen un poco respecto a los años anteriores. Estas pueden ser las causas de que la eficiencia ambiental sea mayor en estos años. Los valores de emisiones se mantienen por debajo de la media pero también los valores de los indicadores económicos, lo que condiciona que la eficiencia ambiental no sea más alta. Para mejorar la situación, sería necesario mejorar su economía. La producción de electricidad a partir de carbón y de fuentes nucleares tienen unos valores similares entorno al 30% por lo que también podría ser ventajoso la búsqueda de otras fuentes de energía para intentar reducir el uso del carbón.

España tiene una eficiencia ambiental media-alta pero hay tres años en los que la eficiencia ambiental es más alta y cercana a 1. España tiene un PIB por encima de la media mientras que en la renta per cápita apenas supera la media y en la mayoría de los casos ni siquiera la alcanza. En las emisiones sí que se superan los valores medios. Esto es lo que hace que los valores de eficiencia ambiental no sean más altos. En los años 2009, 2010 y 2012, los valores de emisiones de dióxido de carbono son ligeramente más bajos que en el resto de años, lo que puede ser la causa de que las eficiencias salgan mayores en esos años. La solución para España sería mejorar su renta per cápita y reducir emisiones.

Estonia mantiene una eficiencia ambiental en unos valores medios pero hay dos años cuyos valores de eficiencia ambiental se salen de la tendencia seguida y son el año 2009 y el año 2012. Estonia tiene un PIB y una renta per cápita muy por debajo de la media aunque, a pesar de que el 90% de su electricidad procede del carbón, las emisiones se encuentran por debajo de la media. Para conseguir una mayor eficiencia, Estonia debería mejorar su economía y apostar por otras fuentes de energía para reducir el uso de carbón, como las energías renovables.

Finlandia tiene una eficiencia ambiental alta en los años 2005 y 2010. En el resto de años se encuentran valores medios de eficiencia. El PIB se encuentra por debajo de la media así como las emisiones pero la renta per cápita sí supera la media. El hecho de que el PIB sea relativamente bajo es lo que puede hacer que la eficiencia no sea más alta. Una posible solución para Finlandia sería aumentar su PIB para tener mayor eficiencia ambiental además de adoptar medidas ambientales que disminuyan el impacto, como las energías renovables.

Francia tiene siempre una eficiencia ambiental muy alta y con pocas variaciones, situándose siempre muy cerca de 1. Las emisiones de dióxido de carbono y metano se encuentran bastante por encima de la media así como la renta per cápita y el PIB. Aunque las emisiones sean relativamente altas, el PIB también es muy alto, lo que hace que tenga una buena eficiencia. Francia debería reducir sus emisiones reduciendo la cantidad de vehículos (que es muy superior a la media) ya que apenas usa el carbón al proceder la mayoría de su electricidad de centrales nucleares (entorno al 70%).

En el caso de Grecia, los valores de eficiencia ambiental se encuentran muy altos para todos los años salvo para el último en el que la eficiencia ambiental disminuye mucho. El PIB se encuentra por debajo de la media al igual que la renta per cápita, pero la eficiencia sí es alta porque las emisiones no son altas y se encuentran bastante por debajo de la media. Sin embargo, se podría mejorar si se consiguiera aumentar el PIB y la renta per cápita. La generación de electricidad a partir de carbón supera el 50% y si se suma la del petróleo ya supera el 70% por lo que Grecia debería buscar otras fuentes de energía, como las renovables. En el año 2012, los valores de los indicadores económicos son más bajos, lo que posiblemente es la causa de que la eficiencia sea mucho menor en ese año.

Hungría muestra unos valores de eficiencia ambiental bastante bajos. A diferencia de muchos países, no presenta valores de eficiencia ambiental anómalos que se salgan de la tendencia que se sigue en el resto de años. En Hungría, los indicadores económicos se encuentran por debajo de la media, lo que hace que, aunque las emisiones se encuentren también por debajo de la media, los valores de

eficiencia ambiental se encuentren en unos valores bastante bajos. La situación podría mejorar si mejorara la economía del país.

Irlanda, como otros países, muestra unos valores de eficiencia ambiental muy alta y que apenas varían. En Irlanda, el PIB se encuentra por debajo de la media al contrario que la renta per cápita, pero también las emisiones se encuentran por debajo de la media, que es lo que hace que su eficiencia sea muy alta. Para que la situación fuera óptima, Irlanda debería aumentar su PIB. También se podrían tomar otras medidas ambientales para mejorar aún más la situación.

En Italia se da la situación contraria a Irlanda. Ambos países tienen una eficiencia ambiental muy alta en todos los años pero mientras que en Irlanda se debe a que las emisiones son bajas, en Italia se debe a que el PIB y la renta per cápita se encuentran bastante por encima de la media, pero las emisiones también superan la media, lo que le resta eficiencia. Lo recomendable para Italia sería que redujeran sus emisiones ya que el volumen de vehículos es muy alto (de hecho está muy por encima de la media).

En el caso de Letonia, la eficiencia se mantiene muy alta y sin fluctuaciones en los años del estudio. Una cuestión muy positiva es que muy poca energía procede del carbón y del petróleo ni de fuentes nucleares en Letonia, por lo que quizás parte de su electricidad procede de fuentes renovables, lo que es muy conveniente para tener una eficiencia ambiental alta. El PIB y la renta per cápita se quedan por debajo de la media pero las emisiones son bastante bajas, lo que hace que la eficiencia sea alta. Sin embargo, para que la situación fuera óptima, se deberían aumentar el PIB y la renta per cápita.

Lituania tiene unos valores de eficiencia ambiental muy altos. Sin embargo, en el año 2007, el valor de eficiencia ambiental es muy diferente a los otros y bastante más bajo. Para las emisiones, Lituania muestra unos valores bajos (por debajo de la media) que es lo que posiblemente haga que su eficiencia sea alta a pesar de que el PIB y la renta per cápita son también bajos y no superan la media. Por esta razón, Lituania debería mejorar su economía. En Lituania, se usan poco carbón y petróleo para obtener electricidad por lo que posiblemente se usan mayormente la energía

nuclear o fuentes renovables, esto último es bueno para tener una eficiencia ambiental alta.

Luxemburgo muestra siempre una eficiencia muy alta. Esto se debe a que las emisiones son bastante bajas y muy por debajo de la media y además la renta per cápita también está por encima de la media, aunque no el PIB. La energía en Luxemburgo no procede apenas ni del carbón, ni del petróleo, ni de fuentes nucleares por lo que suponemos que las energías renovables están bastante desarrolladas en este país. La situación podría ser aún mejor si se consiguiera aumentar el PIB.

Malta mantiene una eficiencia ambiental alta durante los ocho años de estudio. Tiene unos valores de PIB y de renta per cápita muy por debajo de la media. Sin embargo, las emisiones se encuentran muy por debajo de la media y son muy bajas, que es lo que hace que su eficiencia sea alta. Por otra parte, el 100% de la energía procede del petróleo por lo que para mejorar su situación se podría optar por las energías renovables, además de mejorar el PIB y la renta per cápita.

Países Bajos tiene unos valores de eficiencia ambiental alta y constante. Tanto el PIB como la renta per cápita se encuentran por encima de la media al igual que las emisiones de dióxido de carbono aunque las de metano son bastante bajas, lo que hace que, junto con la buena situación de los indicadores económicos, la eficiencia ambiental sea alta. La electricidad que se consume en los Países Bajos no procede del carbón, del petróleo ni de fuentes nucleares por lo que puede proceder de fuentes renovables, lo que sería muy conveniente para tener una eficiencia ambiental alta. Este país debería reducir sus emisiones de CO₂ para que la situación fuera aún mejor.

Polonia presenta unos valores de eficiencia ambiental altos. Los valores de PIB y de renta per cápita se encuentran por debajo de la media y las emisiones de CO₂ superan ligeramente la media. Sin embargo, presenta unos valores de emisiones de metano por debajo de la media, que es lo que puede hacer que su eficiencia sea alta. Por otra parte, el 90% de su electricidad procede del carbón, por lo que sería necesario reducir esta cifra, quizás con el cambio a fuentes renovables de energía. También sería necesario reducir las emisiones de CO₂ y aumentar el PIB y la renta per cápita.

Portugal mantiene una eficiencia ambiental alta para todos los años del estudio salvo en dos años, el 2005 y le 2009. Su PIB y su renta per cápita se encuentran siempre por debajo de la media y las emisiones de metano se encuentran por encima de la media. Sin embargo, sí presenta una eficiencia alta porque las emisiones de dióxido de carbono son muy bajas y muy por debajo de la media. Entre la electricidad que procede del petróleo y del carbón superan el 50% del total de la generación de electricidad por lo que sería conveniente apostar por las energías renovables, así como reducir las emisiones de metano y mejorar el PIB y la renta per cápita.

Reino Unido muestra unos valores de eficiencia ambiental muy altos. Sus valores de PIB y de renta per cápita se encuentran por encima de la media, además de que su PIB es bastante elevado. Esto es lo que hace que su eficiencia sea alta ya que las emisiones son bastante altas y están por encima de la media, por lo que sería recomendable reducir esas emisiones, por ejemplo, reduciendo el volumen de vehículos que es bastante alto en este país o, mejor aún, sustituyendo los vehículos convencionales por vehículos eléctricos o híbridos.

República Checa muestra valores bajos de eficiencia y que se mantienen constantes. Estos valores se deben a que el PIB y la renta per cápita se encuentran por debajo de la media, aunque las emisiones son ligeramente inferiores a la media, por lo que convendría mejorar el PIB y la renta per cápita y reducir las emisiones. El 60% de la energía procede del carbón por lo que también sería conveniente aumentar la energía procedente de fuentes renovables.

Rumanía mantiene sus valores de eficiencia ambiental bajos. Sin embargo, hay dos años en los que la eficiencia ambiental es muy dispar, el 2005 y el 2010. En Rumanía, el PIB y la renta per cápita se quedan bastante por debajo de la media y las emisiones de metano están por encima de la media, lo que hace que, aunque las emisiones de dióxido de carbono estén por debajo de la media, la eficiencia ambiental sea baja. Para mejorar su eficiencia ambiental se debería mejorar el PIB y la renta per cápita además de reducir las emisiones de metano.

En el caso de Suecia, la eficiencia ambiental siempre se encuentra alta. El PIB no llega a superar la media aunque sí lo hace la renta per cápita y las emisiones de

dióxido de carbono y de metano son bastante bajas y no llegan a sobrepasar la media. Esto es lo que hace que su eficiencia ambiental sea elevada pero aún se podría mejorar si se aumentara el PIB. También está el hecho de que apenas hay electricidad que se produzca a partir del petróleo y del carbón lo que es favorable para tener una eficiencia ambiental alta.

Las variaciones en los valores de eficiencia ambiental expuestas anteriormente se muestran en las figuras 6, 7, 8 y 9 en las que se han representado los valores de eficiencia ambiental para cada país durante los 8 años del estudio pero agrupados en las categorías establecidas anteriormente.

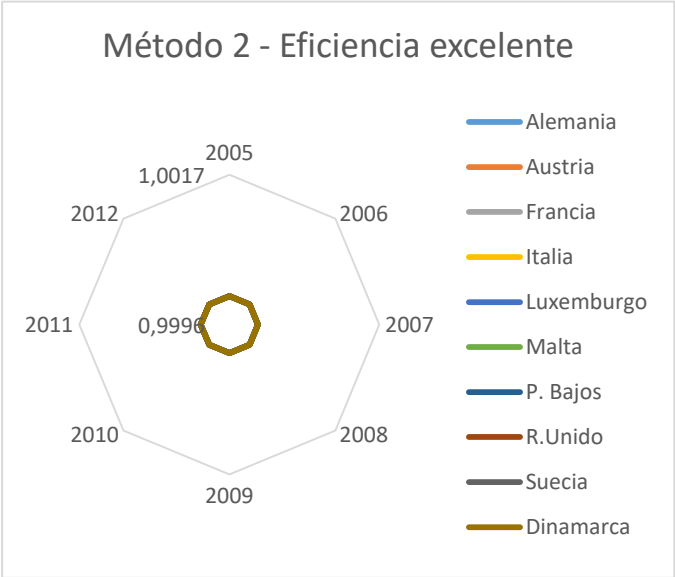
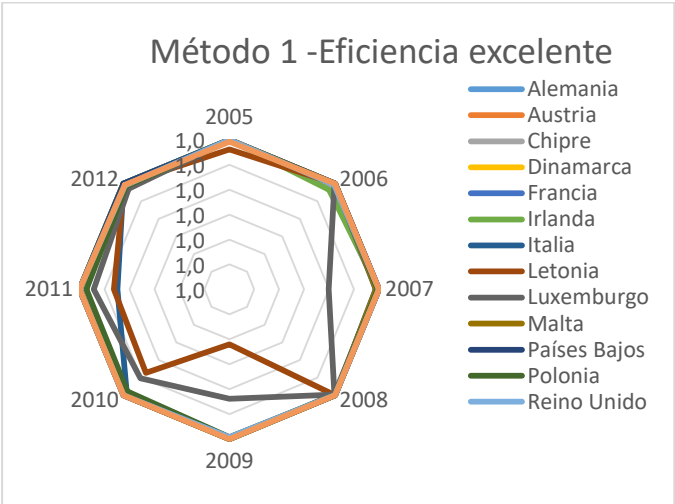


Figura 6. Variación en la eficiencia ambiental en los años 2005-2012 con el método DEA 1 y para el método 2 para los países de la categoría “Eficiencia ambiental excelente”. Fuente: elaboración propia.

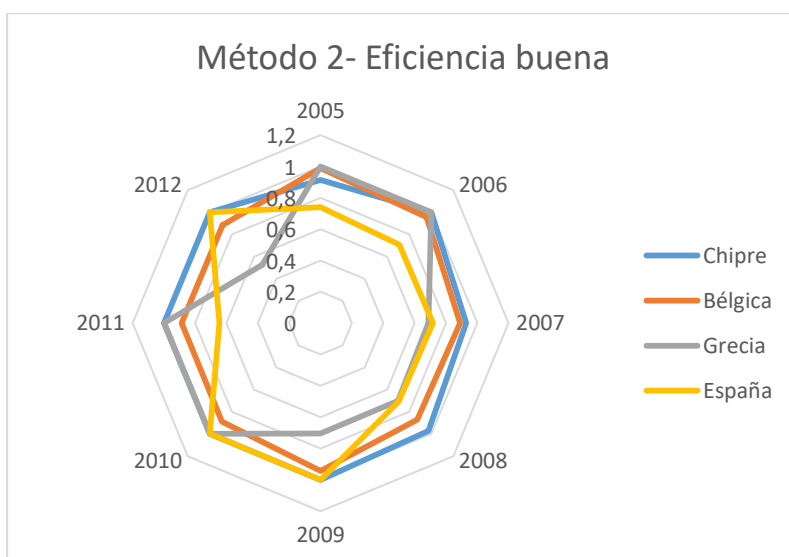
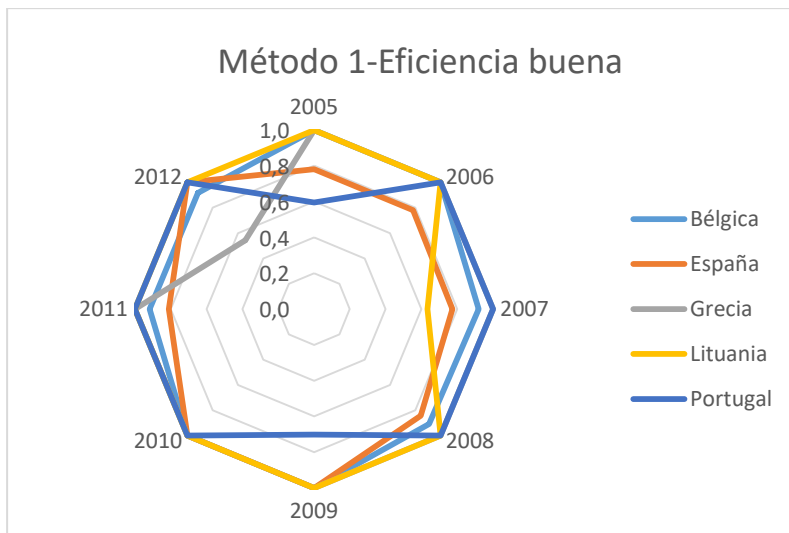
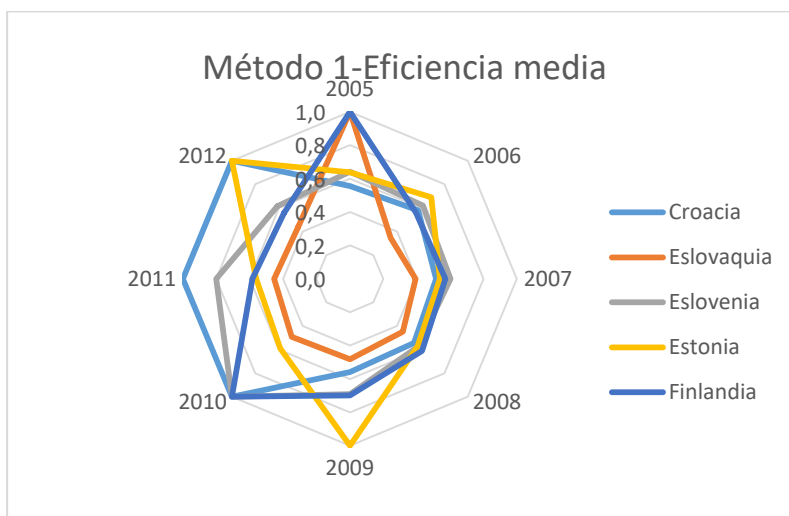


Figura 7: Variación en la eficiencia ambiental en los años 2005-2012 con el método DEA 1 y para el método 2 para los países de la categoría “Eficiencia ambiental buena”. Fuente: elaboración propia.



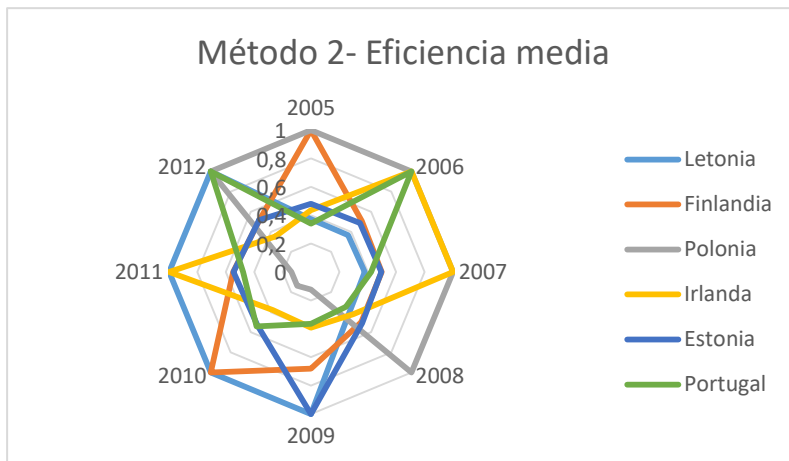


Figura 8: Variación en la eficiencia ambiental en los años 2005-2012 con el método DEA 1 y para el método 2 para los países de la categoría “Eficiencia ambiental media”. Fuente: elaboración propia.

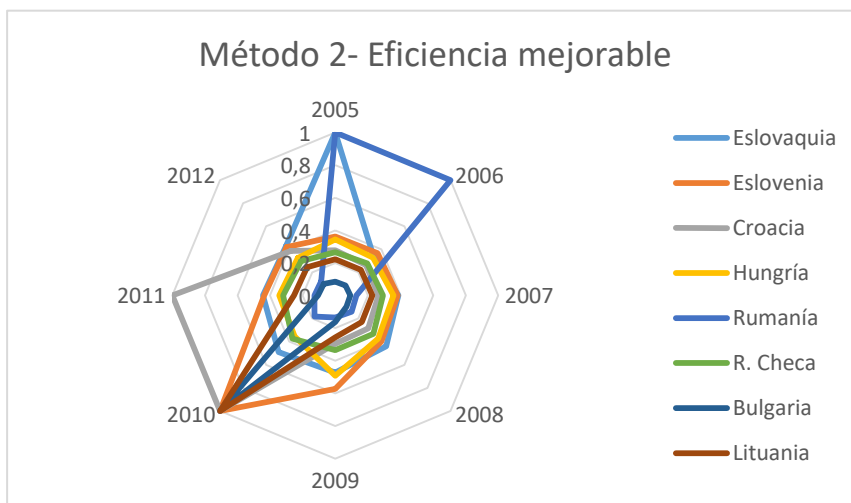
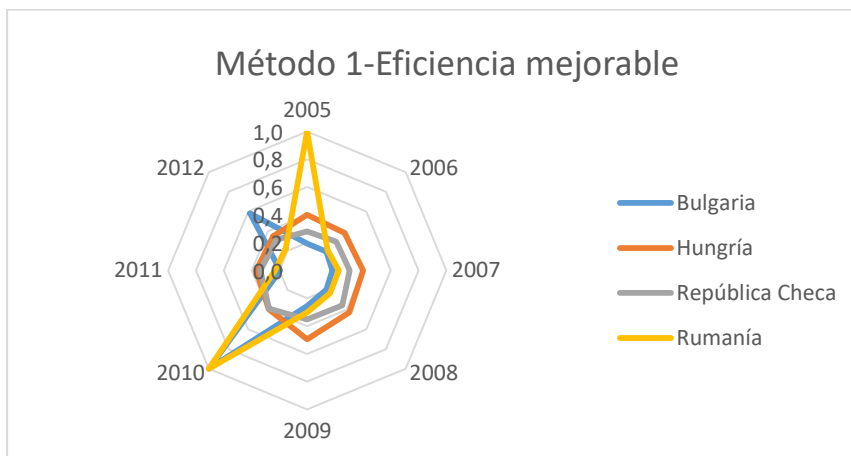


Figura 9: Variación en la eficiencia ambiental en los años 2005-2012 con el método DEA 1 y para el método 2 para los países de la categoría “Eficiencia ambiental mejorable”. Fuente: elaboración propia.

6.5. Evolución temporal de la eficiencia ambiental

En cuanto a la evolución de la eficiencia ambiental para los 8 años de estudio, (2005-2012, los últimos años de los que se tienen datos para todos los países) hay ciertos países en los que la eficiencia ambiental se mantiene bastante constante y alta variando entre 0,99999 y 1. Estos países suelen coincidir con los países que hemos incluido en la categoría de “Eficiencia ambiental excelente”.

Hay países que mantienen también una eficiencia ambiental muy alta en los 8 años pero menor que la de los países con eficiencia ambiental excelente. Este sería el caso de Bélgica, que mantiene una eficiencia ambiental alta con ligeras variaciones.

Hay países que siguen una tendencia y sus valores de eficiencia ambiental fluctúan poco en los ocho años del estudio. Este sería el caso, por ejemplo, de Hungría y de la República Checa, que además tienen una eficiencia bastante baja.

También encontramos países que siguen una tendencia salvo en algunos años en los que los valores de eficiencia ambiental se salen de la tendencia seguida y son mucho más altos que en los restantes años, llegando incluso a una eficiencia del 100%. Esto se da en países como Bulgaria, España y Rumanía, entre otros (quizás por ser países con una economía más inestable y que son más sensibles a los cambios en la situación económica global) y suele darse también en unos años concretos, como el 2005 o el 2011, pero es en el año 2010 donde se concentran la mayor cantidad de datos anómalos para los distintos países con una gran cantidad de ellos con una eficiencia próxima a 1 cuando en los restantes años tienen una eficiencia bastante menor.

Posteriormente, obtenemos los datos de eficiencia ambiental media para cada uno de los años del estudio haciendo la media de los valores de eficiencia ambiental de todos los países, tanto para el Método 1 como para el Método 2 para después hacer la media entre el Método 1 y el Método 2 para analizar la situación global en la Zona Euro. En función de los resultados obtenidos para la media de los Métodos 1 y 2, se puede observar que en los ocho años en los que hemos realizado el estudio, los valores de eficiencia ambiental se muestran bastante altos, con unos valores que

fluctúan entre 0´73605 el año en el que la eficiencia ambiental media fue menor que fue el 2007 y 0´87039 el año con la mayor eficiencia ambiental media que fue el 2010. Esto se debe a que en el año 2010 muchos países muestran una eficiencia ambiental muy alta y más alta que en el resto de años debido a que en ese año las emisiones son algo más bajas, entre otras cuestiones. También hemos obtenido un valor de eficiencia media para el total de la Unión Europea a partir de la media de los valores que habíamos obtenido de la media de los Métodos 1 y 2. Este valor es de 0,7824 que se encuentra en la categoría de eficiencia ambiental media pero es un valor bastante alto. Todos estos valores se encuentran en la tabla 11.

	Método 1	Método 2	Media	Media total Unión Europea
2005	0,86017851	0,74395426	0,80206639	0,78242436
2006	0,80886046	0,74688476	0,77787261	
2007	0,78810251	0,68400509	0,7360538	
2008	0,81113359	0,6682874	0,7397105	
2009	0,84051984	0,71179776	0,7761588	
2010	0,92367475	0,81711428	0,87039451	
2011	0,83072642	0,72399294	0,77735968	
2012	0,84054784	0,71900935	0,7797786	

Tabla 11: Valores de eficiencia ambiental media para los años 2005-2012 obtenidos con el método DEA 1 y para el Método 2 a partir de los datos de eficiencia ambiental media de los 28 países de la UE. Media de los valores de los Métodos 1 y 2. Valor de eficiencia ambiental media para el total de la Unión Europea en el período 2005-2012. Fuente: elaboración propia.

6.6. Obtención de valores medios entre el Método 1 y el Método 2

Una vez realizadas todas estas evaluaciones de los datos, se procedió a sacar datos medios entre los Métodos 1 y 2. Estos valores se obtienen realizando la media de los valores de eficiencia ambiental media obtenidos con el Método 1 y los obtenidos con el Método 2 para los distintos países. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 12 y en la figura 10.

	MÉTODO 1	MÉTODO 2	MEDIA
Alemania	1	1	1
Austria	1	1	1
Países Bajos	1	1	1
Dinamarca	1	1	1
Francia	1	1	1
Suecia	1	1	1
Malta	1	1	1
Reino Unido	1	1	1
Italia	1	1	1
Luxemburgo	1	1	1
Chipre	1	0,977155	0,9885775
Bélgica	0,95817106	0,91412867	0,93614987
Grecia	0,94280217	0,82744886	0,88512552
España	0,87356326	0,81481902	0,84419114
Letonia	1	0,68785791	0,84392896
Polonia	1	0,67487704	0,83743852
Irlanda	1	0,62268811	0,81134406
Portugal	0,91205631	0,56228108	0,7371687
Finlandia	0,69820809	0,65601299	0,67711054
Lituania	0,95425344	0,33238138	0,64331741
Estonia	0,69877384	0,57147078	0,63512231
Croacia	0,71897334	0,47221884	0,59559609
Eslovenia	0,69333977	0,49241602	0,5928779
Eslovaquia	0,50631401	0,49965621	0,50298511
Rumanía	0,42737165	0,35469841	0,39103503
Hungría	0,40165806	0,36453795	0,38309801
R Checa	0,32869324	0,31162983	0,32016153
Bulgaria	0,34892545	0,21638236	0,2826539

Tabla 12: valores medios de los métodos 1 y 2 para la eficiencia ambiental media de los 28 países de la Unión Europea en los años 2005-2012-. Fuente: elaboración propia.

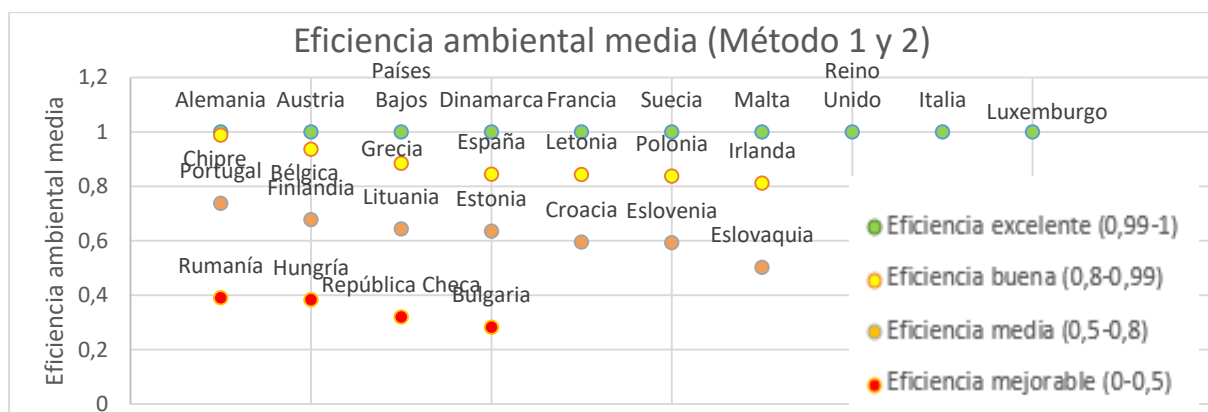


Figura 10: Valores de eficiencia ambiental media obtenida a partir de los datos de eficiencia ambiental media del método 1 y eficiencia ambiental media del método 2. Fuente: elaboración propia.

En vista de estos resultados, los países dentro de la categoría de eficiencia ambiental excelente serían Alemania, Austria, Países Bajos, Dinamarca, Francia, Suecia, Malta, Reino Unido, Italia, Luxemburgo; los de la categoría de eficiencia ambiental buena serían Chipre, Bélgica, Grecia, España, Letonia, Polonia e Irlanda; los países con eficiencia ambiental media serían Portugal, Finlandia, Lituania, Estonia, Croacia, Eslovenia y Eslovaquia; los países con eficiencia ambiental mejorable serían Rumanía, Hungría, República Checa y Bulgaria. Alemania y Austria siguen siendo los países con la eficiencia ambiental relativa media más alta mientras que Bulgaria, Hungría y la República Checa son los que presentan los valores más bajos.

6.7. Método de Análisis Mejorado (MAM)

Una cuestión que se observa analizando los datos de eficiencia ambiental media de los Métodos 1 y 2 es que hay muchos países que teniendo características muy diferentes, se engloban todos en la categoría de eficiencia ambiental excelente y tienen todos una eficiencia ambiental cercana a 1, por lo que quizás el Método DEA es una buena herramienta para dividir los países en distintas categorías según su eficiencia ambiental relativa pero no es capaz de sesgar los valores. Así, tenemos en la misma categoría a países con condiciones muy dispares. Para discriminar los datos, hacemos la comparación entre la eficiencia ambiental media (obtenida de la media de los datos del Método 1 y del Método 2) de todos los países y el PIB medio para los años considerados en nuestro estudio. Los datos se muestran en la figura 11.

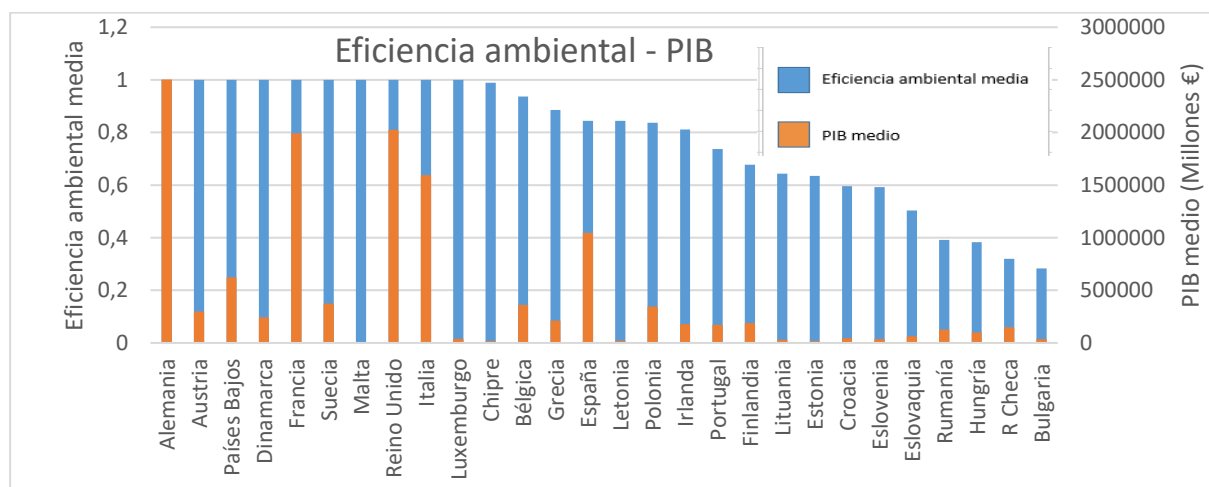


Figura 11: Comparación entre la eficiencia ambiental media obtenida con la media entre el método DEA 1 y el 2 y el PIB medio para los 28 países en los años 2005-2012. Fuente: elaboración propia.

Efectivamente, podemos comprobar que aunque hay países que tienen una eficiencia ambiental media muy similar, su situación real no es la misma ya que tienen muchas diferencias en parámetros importantes, como es el PIB. Esto se puede observar por ejemplo en el caso de Alemania y Chipre o Malta, que aunque tienen una eficiencia ambiental media con un valor cercano a 1, sus PIB difieren enormemente, siendo en el caso de Alemania muy superior a los de Chipre y Malta. España, por su parte, ocupa el quinto mejor PIB de entre los países que estamos estudiando, sin embargo, respecto a eficiencia ambiental media ocupa la décimo novena posición, lo que apoya esta afirmación.

Nuestro método propuesto (MAM) lo que hace es valorar la eficiencia ambiental media obtenida con los Métodos 1 y 2 respecto a los outputs deseables e indeseables y establecer el orden jerárquico más preciso dentro de los países de una misma categoría.

Así, comparamos de nuevo la eficiencia ambiental media de cada país con la Renta per cápita media, las emisiones de CO₂ medias y las de CH₄ medias para los años 2005-2012 y para cada país y obtenemos resultados similares que comparando la eficiencia ambiental con el PIB. Los resultados se muestran en las figuras 12, 13 y 14.

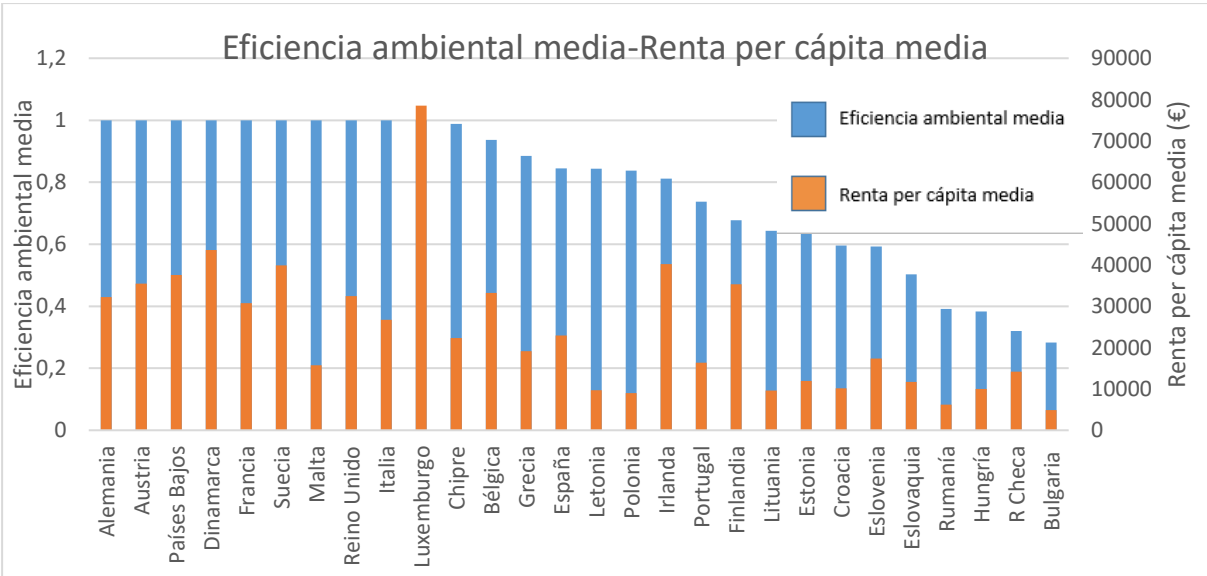


Figura 12: Comparación entre la eficiencia ambiental media obtenida con la media entre el método DEA 1 y el 2 y la Renta per cápita media. Fuente: elaboración propia

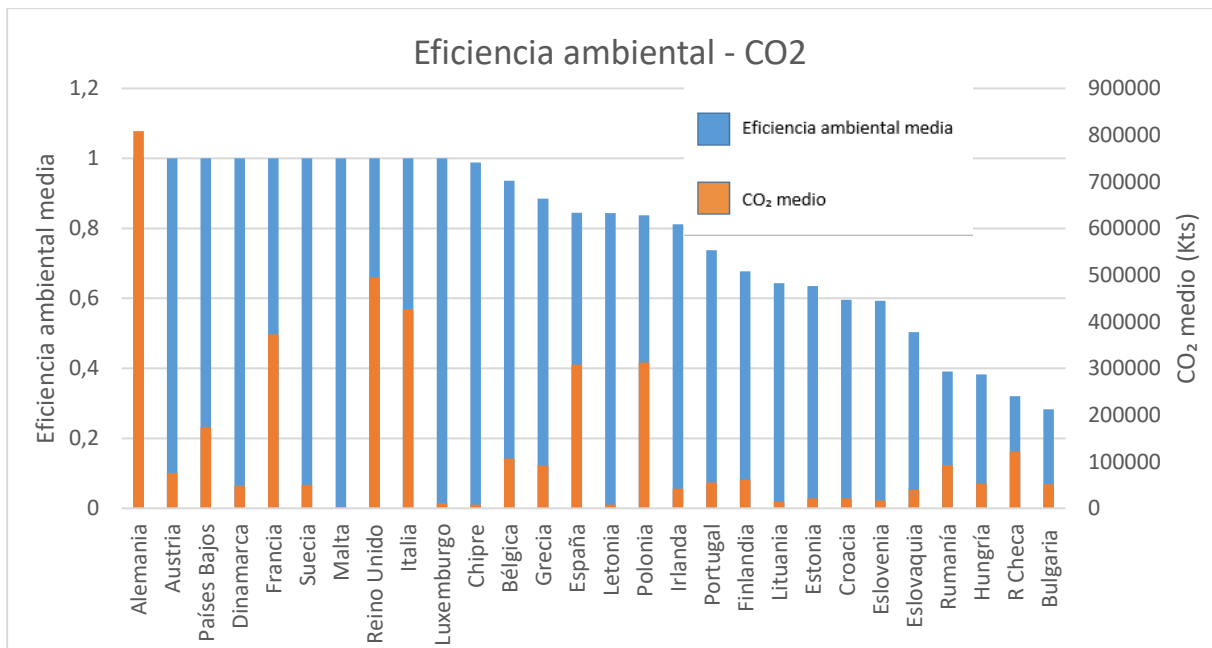


Figura 13: Comparación entre la eficiencia ambiental media obtenida con la media entre el método DEA 1 y el 2 y CO₂ medio. Fuente: elaboración propia

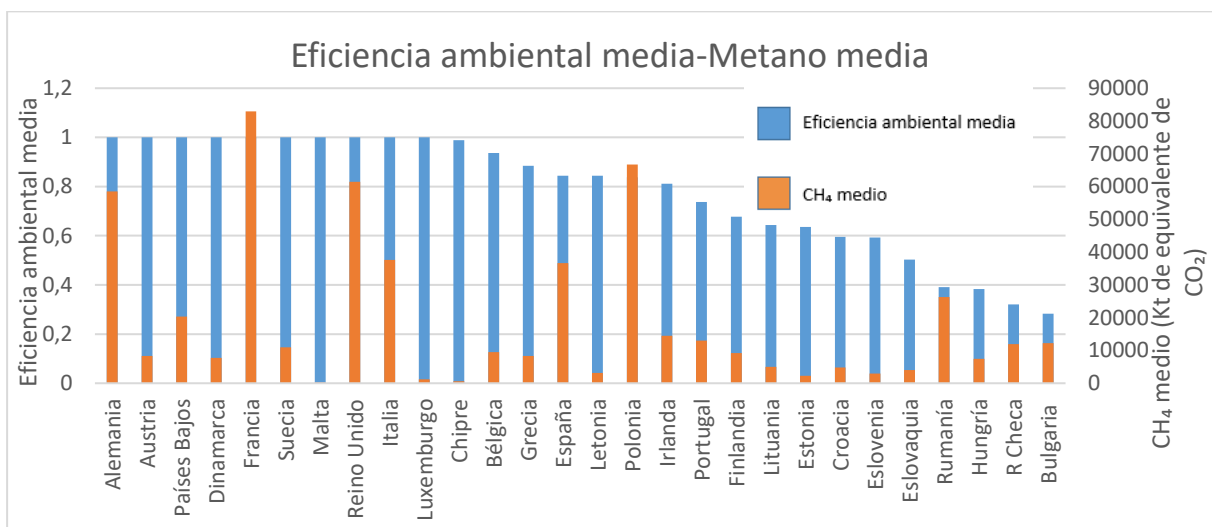


Figura 14: Comparación entre la eficiencia ambiental media obtenida con la media entre el método DEA 1 y el 2 y CH₄ medio. Fuente: elaboración propia

A continuación obtenemos la relación entre el PIB medio y las emisiones de CO₂ medias y vemos que están relacionadas positivamente. Los países que muestran los valores más altos de PIB y CO₂ son Alemania, Francia y Reino Unido siendo los que aunque tienen emisiones de CO₂ altas también tienen PIB alto por los que son los países que dentro de los que hemos obtenido que tienen una eficiencia ambiental con un valor de 1 realmente están actuando de manera más eficiente. En una posición intermedia están España, Italia y Polonia y en el extremo opuesto están el resto de

países. En esta última categoría pueden estar países que tienen unas emisiones de CO₂ bajas pero luego su PIB también es bajo y por eso tienen una eficiencia ambiental alta pero aunque las emisiones sean bajas la situación no es óptima ya que tienen poca industria y su actividad principal es el turismo o similares por lo que realmente son menos eficientes que Alemania, por ejemplo, teniendo el mismo valor de eficiencia ambiental. Los resultados se muestran en la figura 15.

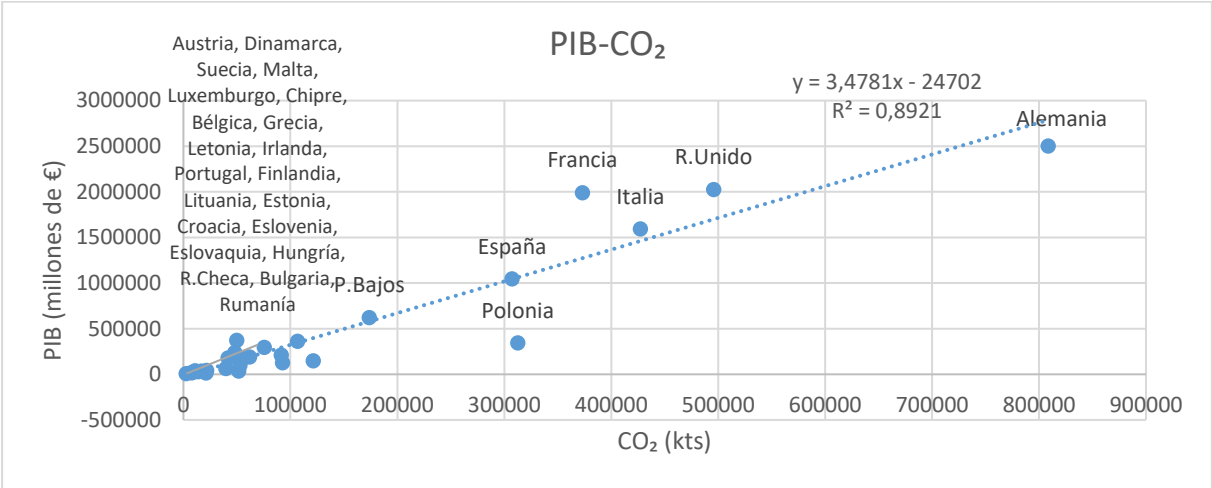


Figura 15: Relación entre los valores de PIB medio y las emisiones de CO₂ medias para los 28 países de la UE en el período 2005-2012. Elaboración propia.

7. CONCLUSIONES

Los resultados de nuestro estudio muestran que hay bastantes países que tienen una eficiencia ambiental relativa alta, siendo estos 14 países de los 28 que hay en la Unión Europea y que eran fuente de nuestro estudio. Dentro de estos 14 países están los países fundadores de la Unión Europea (CEE, 1957) (Alemania, Francia, Italia, Luxemburgo y Países Bajos) y otros que entraron unos años después (Dinamarca y Reino Unido que ingresaron en 1973) por lo que la causa de que tengan una eficiencia ambiental alta puede ser que las políticas sobre medio ambiente de la Unión Europea estén dando resultados favorables. Sin embargo, los países que menos eficiencia tienen muestran unos valores de 0,19, siendo países de nuevo ingreso donde estas políticas medioambientales todavía no están teniendo resultados positivos.

La mayoría de los países siguen una tendencia en los valores de eficiencia ambiental y los datos se mantienen cercanos durante los años del estudio pero hay países que tienen en algunos años unos valores de eficiencia ambiental más altos y diferentes al resto de valores. Estos valores anómalos suelen encontrarse en los años 2005, 2011, 2012, pero es en el año 2010 donde se encuentran la mayor cantidad de países con valores más altos de lo normal.

El valor de eficiencia ambiental global para el conjunto de la Unión Europea sería de 0,78 que es un valor bastante alto y que se engloba dentro de la categoría de eficiencia ambiental media. Sin embargo, cada país aún puede mejorar su situación para aumentar ese valor.

En vista de los resultados obtenidos y los valores de los indicadores empleados, se han propuesto tres tipos de soluciones, habiendo países que necesitan aplicar varias de estas alternativas de mejora medioambiental. Estas alternativas serían:

- Cambiar a modelos económicos más sostenibles (como la Economía Circular) para intentar aumentar su PIB y la Renta per cápita: sería aplicable a todos los países en general, aunque en particular a Austria, Bélgica, Bulgaria, Croacia, Eslovaquia, Eslovenia, España, Estonia, Grecia, Hungría, Irlanda, Letonia, Malta, Polonia, Portugal, República Checa, Rumanía y Suecia. Sin embargo, hay que precisar que esta solución es complicada de aplicar y depende más de las políticas económicas.
- Reducir sus emisiones de dióxido de carbono o de metano o ambas: Alemania, Bulgaria, España, Francia, Italia, Países Bajos, Polonia, Portugal, Reino Unido, República Checa y Rumanía. Esto se podría conseguir utilizando fuentes de energía que no procedan del carbón ni del petróleo o proponiendo cambios en el modelo energético de estos países que los hagan más sostenibles y eficientes medioambientalmente.
- Aumentar la cantidad de energía procedente de fuentes renovables reduciendo la dependencia energética derivada de combustibles fósiles muy contaminantes como el carbón y el petróleo: Chipre, Croacia, Dinamarca, Eslovenia, Estonia, Grecia, Malta, Polonia, Portugal y República Checa.

Por regla general, los resultados de eficiencia ambiental son bastante similares en los dos métodos empleados en nuestro estudio aunque suelen ser menores en el método 2. Sin embargo, también nos encontramos con países en los que su eficiencia baja mucho cuando se usa el método 2 en el caso de que sus emisiones de metano fueran muy altas. Esto nos muestra que si le damos la misma importancia al CO₂ y al metano los resultados salen mayores que si le damos mayor importancia al metano, por tanto, las emisiones de metano son un componente importante para llegar a alcanzar una buena eficiencia ambiental y se deben tomar medidas para la reducción de las emisiones de metano a nivel de la Unión Europea.

Los países que realmente tienen una eficiencia ambiental muy alta son Alemania, Francia y Reino Unido que son las que presentan emisiones de CO₂ algo altas pero manteniendo el PIB y la Renta per cápita también altas siendo estos países los que más cumplen con los objetivos de la Unión Europea de “favorecer un desarrollo sostenible basado en un crecimiento económico equilibrado y la protección del medio ambiente”.

En general, observamos que los métodos DEA que se vienen utilizando para la medida de la ecoeficiencia o eficiencia ambiental son bastante precisos y son una buena herramienta aplicada para categorizar situaciones. No obstante, se hace necesaria la mejora de estos métodos con la introducción de un análisis más riguroso mediante la implementación de nuevos métodos de valoración como el propuesto en nuestro estudio (MAM) y que permitan jerarquizar situaciones dentro de cada categoría resultante. Lo que puede dejar las puertas abiertas a futuros estudios orientados en esta línea.

8. ANEXOS

8.1. Anexo I: Cálculo de la eficiencia ambiental relativa con DEA en Excel (Método 1) utilizando la herramienta Solver

Este procedimiento se repite para cada uno de los países en cada uno de los distintos años. Para cada uno de los años vamos a tener un archivo Excel distinto y en cada

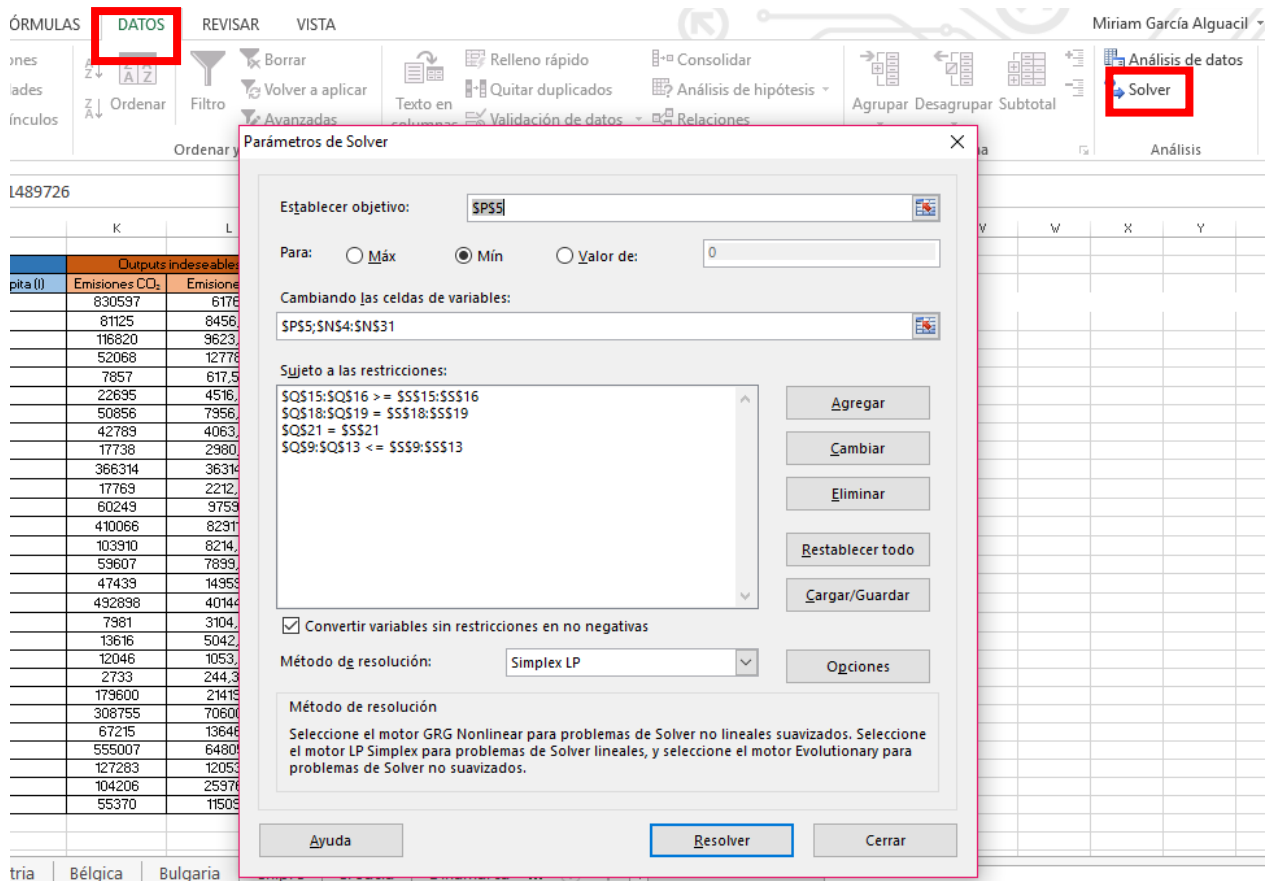


Figura 17: Ejemplo de cuadro de diálogo para aplicar Solver para el cálculo de la eficiencia ambiental relativa

En “Establecer objetivo” incluimos la casilla de la eficiencia ambiental.

En “Cambiando las celdas de variables” incluimos los valores de la columna de Z_k y la casilla de la eficiencia ambiental.

En “Sujeto a las restricciones” metemos las restricciones del modelo DEA 1 utilizando los datos obtenidos anteriormente en el cuadro.

En “Método de resolución” seleccionamos “Simplex LP” y le damos a “Resolver” para obtener el valor de eficiencia ambiental relativa para ese país.

8.2. Anexo II: Cálculo de la eficiencia ambiental relativa con DEA en Excel (Método 2) utilizando la herramienta Solver

La estructura de la hoja Excel para el método 2 es igual en lo que se refiere a los datos. Volvemos a tomar como ejemplo a Alemania en el año 2005, según se muestra en la figura 18.

9. BIBLIOGRAFÍA

Banco Central de Inglaterra (Bank of England).
(<https://www.bankofengland.co.uk/news/statistics>)

Banco Central Europeo (European Central Bank).
(<https://www.ecb.europa.eu/stats/html/index.en.html>)

Banco de España (<https://www.bde.es/bde/es/areas/estadis/>)

Banco Mundial (<https://datos.bancomundial.org/indicador>)

Banker R.D., Charnes A. & Cooper W.W. (1984). "Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis". *Management Science* 30, 1078-1092

Chao F. & Miao W. (2017). "Analysis of energy efficiency and energy savings potential in China's provincial industrial sectors". *Elsevier*
(<http://dx.doi.org/10.1016/j.clepro.2017.07.081>)

Charnes, Cooper, Golany, Seiford & Stutz. (1985). "Foundations of data envelopment analysis and Pareto-Koopmans empirical production functions". *Journal of Econometrics* 30, 91-107

Charnes, Cooper & Rhodes (1978). "Measuring the efficiency of decision making units". *European Journal of Operational Research* 429-444.

Claver E., Molina J.F., Tari J. J. (2011). "Gestión de la calidad y gestión medioambiental". *Editorial Pirámide*. I.S.B.N.: 978-84-368-2458-2

Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (1987). "Our common future". (http://www.ecominga.uqam.ca/PDF/BIBLIOGRAPHIE/GUIDE_LLECTURE_1/CMMAD-Informe-Comision-Brundtland-sobre-Medio-Ambiente-Desarrollo.pdf)

Comunidad Económica Europea (1957). "Tratado Constitutivo de la Comunidad Económica Europea". (<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/HTML/?uri=CELEX:11957E&from=ES>)

Conferencia de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y el Desarrollo (1992). "Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo" (http://www.unesco.org/education/pdf/RIO_S.PDF)

Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (1997). "Protocolo de Kioto". (<https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>)

Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (2015). "Adoption of the Paris Agreement" (<https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/spa/l09s.pdf>)

Cook & Seiford (2008). "Data envelopment analysis (DEA)- Thirty years on". *Elsevier* (doi:10.1016/j.ejor.2008.01.032)

Cook & Zhu (2008). "Data Envelopment Analysis: Modeling Operational Processes and Measuring Productivity", ISBN-10: 1434830233

Cooper, Park & Pastor (1999). "RAM: Range adjusted measure of inefficiency for use with additive models and relations to other models and measures in DEA". *Management Science* 45,597-607

Fare & Lovell (1978). "Measuring the technical efficiency of production". *Journal of Economic Theory* 19, 150-162

Fondo Monetario Internacional (IMF, International Monetary Fund). (<http://www.imf.org/en/publications>)

Green, Cook & Doyle (1997). "A note on the additive data envelopment analysis model". *Journal of the Operational Research Society* 48 (4), 446-448.

Hansen J., Sato M., Kharecha P. y otros (2007). "Climate change and trace gases". *Philosophical Transactions of the Royal Society* 365(1866): 1925-1954.

Instituto Nacional de Estadística de Alemania (Statistisches Bundesamt). (<https://www.destatis.de/DE/Startseite.html>)

Instituto Nacional de Estadística de España (INE). (<http://www.ine.es/>)

Instituto Nacional de Estadística de Francia (INSEE). (<https://www.insee.fr/fr/statistiques>)

Instituto Nacional de Estadísticas de Italia (Istat, L'Istituto nazionale di statistica). (<https://www4.istat.it/it/istituto-nazionale-di-statistica>)

Ludgren & Zhou (2017). "Firm performance and the role of environmental management". *Journal of environmental management*. 203 (2017) 330-341

Meilin W., Qingyuan Z., Rui K. & Yi Y. (2017). "Some new ranking criteria in data envelopment analysis under uncertain environment". *Elsevier* (<https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.05.034>)

Pastor, Ruiz, & Sirvent (1999). "An enhanced DEA Russel graph efficiency measure". *European Journal of Operational Research* 115, 596-607.

Peng Z., Kim L. P. & Beng W. A. (2006). "Data Envelopment Analysis For Measuring Environmental Performance", *Handbook of Operation Analysis Using Data Envelopment Analysis*, 31-47

Pyoungsoo L. & You-Jin P. (2017). "Eco-Efficiency Evaluation Considering Environmental Stringency". *Sustainability* 2017, 9, 661.

Shih-Heng Y., Yu G. & Yih-Chearng S. (2017). "A Comprehensive Evaluation of Sustainable Development Ability and Pathway for Major Cities in China". *Sustainability* 2017, 9, 1483; (doi:10.3390/su9081483)

Toshiyuki S. (2014). “Energy Usage and Sustainability Development in Asian Nations Measured by DEA Intermediate Approach”. *Energy Manuscript Draft*. Manuscript Number: EGY-D-17-02541

Tyteca D. (1997). “Linear programming models for the measurement of environmental performance of firms—Concepts and empirical results”. *Journal of Productivity Analysis*, 8, 183–197.

Unión Europea (2007). “Paquete de medidas sobre clima y energía hasta 2020”. (https://ec.europa.eu/clima/policias/strategies/2020_es)

Unión Europea (2014). “Un medio ambiente sano y sostenible para las generaciones venideras”. (<https://publications.europa.eu/es/publication-detail/-/publication/3456359b-4cb4-4a6e-9586-6b9846931463>)

World Business Council for Sustainable Development, WBCSD (1992). “Eco-efficiency” (<https://www.wbcsd.org/>)

World Trade Organization (https://www.wto.org/english/res_e/statis_e/statis_e.htm)

Xianhua W., Ling T., Ji G., Yingying W., Hui L. & Weiwei Z. (2015). “A study of allocative efficiency of PM_{2.5} emission rights based on a zero sum gains data envelopment model”. *Elsevier* (<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.025>)

Zhang B., Lu D., He Y., & Chiu Y.-H. (2018). “The efficiencies of resource-saving and environment: A case study based on Chinese cities” *Energy*, Volume 150, Issue undefined, 1 May 2018 (DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.004>)

ZhiQiang G., JunGen D., YongMing H. & QunXiong Z. (2017). “Energy and environment efficiency analysis based on an improved environment DEA cross-model: Case study of complex chemical processes”. *Elsevier* (<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.07.132>)