

Evolución de las emisiones de GEI a nivel mundial: análisis multidimensional de desigualdad y polarización

Carmen Trueba, Lorena Remuzgo, Vanesa Jordá, José María Sarabia

Departamento de Economía

Universidad de Cantabria

Resumen

Las medidas multidimensionales de entropía generalizada propuestas por Maasoumi (1986) permiten analizar la desigualdad a través de las diferentes dimensiones de un fenómeno de interés. Con esta metodología, y partiendo de las componentes interregional e intrarregional de dichas medidas, Gigliariano y Mosler (2009) proponen estudiar la polarización desde un punto de vista multidimensional. En este trabajo, aplicamos dicho enfoque novedoso para el estudio de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a nivel mundial, considerando diferentes medidas de desigualdad y de polarización. En particular, se analizan las emisiones de los tres principales GEI: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O). Los datos utilizados provienen del World Resources Institute (WRI, CAIT, 2012) y los grupos de países están contruidos en base a la clasificación de la International Energy Agency (IEA, 2012). Los resultados ponen de manifiesto que cuanto mayor peso se otorga a los países menos contaminantes, mayor es el incremento de la desigualdad y la polarización multidimensional de las emisiones de GEI a nivel mundial en el periodo 1990-2005.

Palabras Clave: Desigualdad Multidimensional, Polarización, Índices de entropía generalizada, Economía ambiental, Gases de efecto invernadero.

Evolution of the global GHG emissions: multidimensional analysis of inequality and polarization

Abstract

Multidimensional generalized entropy measures proposed by Maasoumi (1986) allow the analysis of inequality through different dimensions of a phenomenon of interest. Using this methodology, and taking into account the within- and the between-group inequality components of these measures, Gigliariano and Mosler (2009) propose the study of polarization from a multidimensional perspective. In this paper, we apply this approach to the study of the global GHG emissions, by considering different measures of inequality and polarization. We have analysed the three main GHG emissions: Carbon dioxide (CO₂), Methane (CH₄) and Nitrous oxide (N₂O). The analysis is based on data from the World Resources Institute (WRI, 2012) and the groups of countries are constructed according to the International Energy Agency classification (IEA, 2012). The results show that the higher the weight given to the changes among the less polluting countries, the greater the increase observed in international emissions inequality and polarization.

Keywords: Multidimensional Inequality, Polarization, Generalized Entropy Indices, Environmental Economy, Greenhouse Gas Emissions.

1. Introducción

Con la celebración de la Convención Marco sobre Cambio Climático de las Naciones Unidas (CMCCNU) en 1992 se alcanza un acuerdo internacional sobre la importancia de limitar el nivel global de emisiones de gases de efecto invernadero¹ (GEI) y estabilizar la concentración de los mismos en la atmósfera.

Por este motivo y, dado que el dióxido de carbono (CO₂) es el GEI más abundante en la atmósfera, el estudio de la desigualdad en las emisiones de CO₂ ha recibido especial atención por parte de muchos autores. De entre todos los trabajos en los que se analiza la evolución internacional de la desigualdad en las emisiones de CO₂, cabe destacar los llevados a cabo por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC, 1996a), Heil y Wodon (1997; 2000), Hedenus y Azar (2005), Sun (2002), Alcántara y Duro (2004), Padilla y Serrano (2006), Ezcurra (2007), Groot (2010), Cantore y Padilla (2010) y Mahony (2013), entre otros.

Sin embargo, la actividad humana llevada a cabo durante la era industrial ha provocado un incremento drástico tanto de las emisiones de CO₂ como del resto de GEI, por lo que, los gases de efecto invernadero diferentes del CO₂ juegan un papel importante para entender y hacer frente al cambio climático global.

El último *Boletín sobre los gases de efecto invernadero* (WMO, 2012) refleja el incremento en la concentración de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O) en un 140, un 259 y un 120 por ciento desde el año 1750, respectivamente. El aumento de la concentración mundial de CO₂ se debe en gran medida a la utilización de combustibles fósiles; mientras que el incremento observado en la concentración de CH₄ y N₂O tiene su origen, principalmente, en las prácticas agrícolas (IPCC, 2007b).

Asimismo, la mitigación de los GEI distintos al CO₂ puede ejercer un importante papel en la estrategia climática global y regional por dos motivos. Por un lado, estos gases contribuyen en mayor medida al calentamiento global que el CO₂, por unidad de masa (USEPA, 2012). En este sentido, cerca del 30 por ciento del efecto invernadero antropogénico provocado desde tiempos preindustriales se puede atribuir a los mismos (IPCC, 2001). Por otro lado, reducir las emisiones de los GEI distintos al CO₂ supone un coste relativamente bajo en comparación con el coste asociado a la mitigación de las emisiones de CO₂ (USEPA, 2006a). Por lo tanto, si solamente

¹ En el Anexo A del Protocolo de Kioto (Naciones Unidas, 1998) se recoge que los gases de efecto invernadero (GEI) son los siguientes: el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄), el óxido nitroso (N₂O), los hidrofluorocarbonos (HFCs), los perfluorocarbonos (PFCs) y el hexafluoruro de azufre (SF₆).

se consideran las emisiones de CO₂, no se puede reflejar la situación real de la problemática actual del cambio climático, siendo necesario incorporar dichos gases en los análisis de la economía del clima.

Con las medidas multidimensionales se puede analizar la desigualdad de las emisiones, de manera conjunta, a través de la consideración de los tres GEI más importantes: el CO₂, el CH₄² y el N₂O³, también conocidos como gases de larga duración.

En esta misma línea, en los últimos años ha irrumpido el concepto de polarización, como un fenómeno que, a pesar de estar directamente relacionado con la desigualdad, diverge en cierta manera. Mientras que las medidas de desigualdad miden la dispersión de una distribución respecto a un valor de referencia –generalmente la media–, la polarización permite identificar el surgimiento de polos en una distribución, lo que está relacionado con las distribuciones multimodales (Esteban y Ray, 1994; Wolfson, 1994). El concepto de polarización subyace de la idea de considerar a la población dividida en diferentes subgrupos que, de acuerdo a los atributos considerados, sean internamente homogéneos, pero diferentes entre sí.

Así, a partir de las medidas de entropía generalizada de Maasoumi (1986), y considerando la descomposición en sus componentes interregional e intrarregional, es posible obtener medidas de polarización desde un punto de vista multidimensional⁴ (Gigliariano y Mosler, 2009). En este trabajo aplicamos dicho enfoque novedoso para el estudio de las emisiones de GEI a nivel mundial, para las regiones contempladas por la International Energy Agency (IEA) en el periodo 1990-2005.

La estructura de este trabajo es la siguiente. En la segunda sección, se describe el Potencial de Calentamiento Mundial, principal medida para comparar las emisiones atmosféricas procedentes de distintos GEI. Seguidamente, se detalla la metodología empleada en el análisis de desigualdad y polarización multidimensional. En la sección cuatro, se muestran los principales resultados del análisis propuesto. Por último, se exponen las conclusiones y, en base

² El CH₄ daña la atmósfera unas 21 veces más que el CO₂ durante un periodo de tiempo de 100 años (IPCC, 1996b). Sin embargo, su importancia radica en que su vida en la atmósfera es de aproximadamente 12 años en comparación con los 100 años del CO₂. Esta última característica convierte al CH₄ en un gas a tener en cuenta para frenar el cambio climático ya que se puede obtener respuesta de las acciones de mitigación de dicho gas en el corto plazo.

³ El N₂O provoca un calentamiento de la atmósfera de aproximadamente unas 310³ veces más que el CO₂ en un período de 100 años (IPCC, 1996b), teniendo una larga permanencia en la atmósfera (unos 120 años).

⁴ En el ámbito ambiental se ha trabajado previamente con medidas de polarización desde una perspectiva unidimensional, considerando únicamente las emisiones de CO₂ (Duro y Padilla, 2008; Duro, 2010).

a los resultados obtenidos en ambos estudios, se proponen una serie de recomendaciones de política económica.

2. El Potencial de Calentamiento Mundial (PCM) como medida de comparación de las emisiones de los GEI

La actividad humana libera a la atmósfera muchos gases que producen el cambio climático. Dichos gases poseen características muy diferentes en cuanto a la cantidad emitida, el impacto que producen sobre el clima o su duración en la atmósfera.

El diseño de políticas climáticas que consideren la acción conjunta de los diferentes GEI debe apoyarse en medidas que permitan establecer equivalencias entre las emisiones de los mismos (Tol et al., 2008).

De todas las medidas propuestas en la literatura sobre cambio climático dedicada a este propósito, cabe destacar el Potencial de Calentamiento Mundial (PCM) (IPPC, 1990, pp.41-68; IPPC, 2007c, pp. 129-234). El concepto de PCM fue introducido en 1990 (IPCC, 1990; Lashof y Ahuja, 1990; Rodhe, 1990; Victor, 1990) con el objetivo de poder comparar las emisiones atmosféricas procedentes de diferentes GEI durante un determinado horizonte temporal⁵.

El PCM es un índice que –basado en las propiedades radiativas de los GEI suficientemente mezclados– mide el forzamiento radiativo⁶ de una unidad de masa de un determinado GEI a lo largo de un plazo de tiempo dado, en comparación con el causado por el CO₂.

Concretamente el PCM se define como:

$$PCM_i \equiv \frac{\int_0^{HT} FR_i(t)dt}{\int_0^{HT} FR_r(t)dt} = \frac{\int_0^{HT} a_i \cdot [C_i(t)]dt}{\int_0^{HT} a_r \cdot [C_r(t)]dt}$$

donde PCM_i es el Potencial de Calentamiento Mundial del gas i , HT hace referencia al horizonte temporal considerado, FR_i denota el forzamiento radiativo medio a nivel mundial del gas i , a_i es el forzamiento radiativo que provoca cada unidad adicional del gas i en la atmósfera

⁵ Rasmussen (1975) fue uno de los primeros autores en proponer una metodología para comparar los riesgos que las emisiones atmosféricas procedentes de diferentes GEI causan durante un determinado horizonte temporal.

⁶ El *forzamiento radiativo* hace referencia a la alteración del balance de energía radiante en la atmósfera debido a la absorción de radiación infrarroja terrestre por parte de las moléculas del GEI que, a su vez, distorsiona el balance de energía en la superficie terrestre (forzamiento climático). (Santamaría Antonio, 2010). Así, un valor del forzamiento radiativo positivo (negativo) fomenta el calentamiento (enfriamiento) de la superficie terrestre (IPCC, 2007a).

(*eficiencia radiativa*), $C_i(t)$ representa la vida del gas i en la atmósfera y r es el gas de referencia (CO_2).

El PCM representa el efecto conjunto de dos características: el período de permanencia en la atmósfera de cada gas y su eficacia relativa absorbiendo la radiación infrarroja térmica saliente.

Los supuestos detrás del concepto de PCM son los siguientes. En primer lugar, considera un horizonte temporal finito. En segundo lugar, no aplica ninguna tasa de descuento al efecto invernadero ocasionado por el gas durante el horizonte temporal considerado, siendo nulo el efecto de dicho gas una vez finalizado dicho periodo de tiempo. Asimismo, supone que la concentración de GEI permanece constante y, por último, que el impacto que ocasiona el gas es proporcional a su forzamiento radiativo.

Actualmente, el IPCC realiza estimaciones de los valores del PCM para los distintos GEI con horizontes temporales a 20, 100 y 500 años. El establecimiento de un horizonte temporal fijo a la hora de comparar los efectos de las emisiones de los distintos GEI es un inconveniente que presenta esta medida dada la existencia de gases de corta y de larga duración en la atmósfera. Así, algunos científicos del clima sugieren que la separación entre los gases de efecto invernadero de corta y de larga vida podría proporcionar un mejor marco para la aplicación de políticas (Manning et al., 2009).

Otra limitación del PCM, es que sus valores se actualizan a lo largo del tiempo, incorporando los cambios en las concentraciones atmosféricas de los GEI, así como, los nuevos conocimientos científicos en esta materia. Este cálculo puede fomentar que se enfatice cada vez más en la reducción de las emisiones atmosféricas procedentes de los GEI de vida corta, retrasando la disminución de los GEI de larga vida como el CO_2 . De forma que, en un horizonte temporal superior a 100 años, se puede agravar el problema del cambio climático⁷.

Sin embargo, a pesar de que las limitaciones que presenta el PCM incentivan la búsqueda de alternativas para comparar los diferentes GEI⁸, la mayoría de la literatura considera esta medida como referente para comparar las emisiones procedentes de distintos GEI. Así, Manning et al.

⁷ En este sentido, para evitar que la concentración atmosférica de los GEI pueda dar lugar a confusión a la hora de establecer políticas para lograr la estabilización en el largo plazo, la CMCCNU ha propuesto congelar los valores de PCM calculados en el Segundo Informe de Evaluación del IPCC (IPCC, 1996b).

⁸ Otras medidas que han recibido especial atención para medir el efecto de los diferentes GEI son el Potencial de Daño Mundial (Kandlikar, 1995), el Potencial de Coste Mundial (Manne y Richels, 2001) y el Potencial de Temperatura Mundial (Shine et al., 2005; 2007). En esta línea, Tol et al. (2008) realizando una revisión de las medidas alternativas para comparar los GEI, sugiere que cada medida es ideal para una perspectiva específica del cambio climático.

(2009) exponen que el resto de medidas se deben considerar como complementarios al PCM pero no como sustitutos.

3. Metodología

En este apartado se detalla la metodología para calcular las medidas de desigualdad multidimensional. Estas medidas son descomponibles aditivamente por grupos de población permitiendo el estudio tanto de la desigualdad dentro de cada región como la desigualdad entre regiones.

Consideremos una muestra de N países, de los cuales se quiere estudiar, de manera conjunta, K dimensiones relacionadas con el cambio climático. Estos valores se recogen en la matriz X , de dimensión $N \times K$:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1j} & \dots & x_{1K} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ x_{i1} & \dots & x_{ij} & \dots & x_{iK} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ x_{N1} & \dots & x_{Nj} & \dots & x_{NK} \end{bmatrix},$$

donde cada elemento de la matriz, x_{ij} , es el valor de la dimensión o variable j correspondiente al país i .

En este trabajo, dado que se desea analizar la desigualdad en las emisiones de los tres principales GEI, los valores x_{ij} se corresponden con las emisiones de dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O) de cada país.

Con el objetivo de analizar la evolución de la desigualdad, consideramos las medidas de desigualdad multidimensional propuestas por Maasoumi (1986). Estas medidas están basadas en el concepto de entropía generalizada y se definen como:

$$GEM_{\gamma}(\mathbf{X}) = \frac{1}{\gamma(1+\gamma)} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\left(\frac{s_i}{\bar{s}} \right)^{1+\gamma} - 1 \right], \quad \gamma \neq -1, 0,$$

donde el parámetro γ representa el peso asignado a las diferentes partes de la distribución. De esta forma, cuanto mayor sea este parámetro de sensibilidad, mayor ponderación se otorga a los países que menos gases emiten.

Cuando γ toma los valores -1 –los países más contaminantes tienen más peso– y 0 –se asigna el mismo peso a todas las partes de la distribución–, nos encontramos ante los casos particulares de esta medida, los cuales se expresan respectivamente como:

$$GEM_{-1}(\mathbf{X}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \log \left(\frac{\bar{s}}{s_i} \right),$$

$$GEM_0(\mathbf{X}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{s_i}{\bar{s}} \log \left(\frac{s_i}{\bar{s}} \right).$$

Independientemente del caso que se desee calcular, los diferentes valores de las variables se agregan, para cada país, utilizando una media ponderada generalizada de orden $-\beta$:

$$s_i = \left(\sum_{j=1}^K \delta_j x_{ij}^{-\beta} \right)^{-1/\beta} \quad i = 1, \dots, N$$

donde \bar{s} es el valor medio de los valores s_i :

$$\bar{s} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N s_i.$$

Asimismo, δ_k ($k = 1, \dots, K$, $0 \leq \delta_k \leq 1$) y β ($-1 \leq \beta \leq \infty$) son dos parámetros con su correspondiente significado. Concretamente, δ_k es el peso asignado a cada variable k y β representa la elasticidad de sustitución entre las dimensiones consideradas.

Como se ha visto en el apartado anterior, para comparar el efecto de los GEI es necesario tener en cuenta tanto su contribución relativa al efecto invernadero como la cantidad de emisiones de cada gas que se vierten a la atmósfera.

Dado que todas las emisiones están expresadas en CO₂-equivalente usando los PCM a 100 años del IPCC (1996b)⁹, el “daño” que provoca cada gas queda recogido en los elementos de la matriz X .

Por tanto, el peso asignado a cada uno de los contaminantes se corresponde con la “cantidad” de cada uno de ellos, es decir, con la proporción que representa la concentración atmosférica

⁹ Aunque los valores del PCM se han actualizado en el Tercer y Cuarto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2001; 2007a), las estimaciones de emisiones de estos informes continúan utilizando los valores del PCM del Segundo Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 1996b) con el objetivo de ser consistente con los informes mundiales llevados a cabo por la CMCCNU.

de cada gas en el año 1994¹⁰. Concretamente, el parámetro δ toma el valor de 0,9943 para el CO₂; de 0,0048 para el CH₄ y de 0,0009 para el N₂O¹¹.

De esta manera, en la medida de desigualdad ya se contemplan las dos características que permiten comparar las emisiones procedentes de diferentes GEI. Por ello, en primer lugar se considera que $\beta = -1$, esto es, que los contaminantes mantienen una relación perfecta de sustitución.

Sin embargo, considerar la contribución relativa al efecto invernadero y la cantidad de cada gas como únicos factores que impiden la comparación de GEI es un supuesto que restringe la existencia de otros agentes. Por ello, en este trabajo se consideran diferentes grados de sustitución entre las dimensiones. De forma que, si el parámetro toma valores superiores a -1, como por ejemplo, -0,5 y 5, el grado de sustitución va disminuyendo¹².

Los índices de desigualdad multidimensional utilizados (GEM_γ , GEM_{-1} y GEM_0) son aditivamente descomponibles, lo cual permite analizar la desigualdad interregional e intrarregional de los grupos ($g = 1, \dots, G$) previamente determinados. Considerando la metodología propuesta por Maasoumi (1986) y Maasoumi y Nickelsburg (1988), el índice GEM_γ admite la descomposición:

$$GEM_\gamma(\mathbf{X}) = B_\gamma(\mathbf{X}) + W_\gamma(\mathbf{X}),$$

donde $B_\gamma(\mathbf{X})$ es el componente de desigualdad interregional o *between-group* cuya expresión es la siguiente:

$$B_\gamma(\mathbf{X}) = f \left(\sum_{g=1}^G \frac{N_g}{N} h(\bar{s}^g, \bar{s}) \right),$$

y $W_\gamma(\mathbf{X})$ es el componente de desigualdad intrarregional o *within-group*, que viene expresado por:

$$W_\gamma(\mathbf{X}) = \sum_{g=1}^G w_g f \left(\frac{1}{N_g} \sum_{i \in g} h(s_i, \bar{s}^g) \right),$$

teniendo en cuenta que

¹⁰ Se ha considerado la concentración de los GEI del año 1994 (IPCC, 1996b) dado que los datos de emisiones están expresados en términos de CO₂ equivalente, con referencia a los valores de PCM del IPCC (1996b).

¹¹ La concentración de CO₂, CH₄ y N₂O en el año 1994 era de 358000, 1720 y 312 ppb, respectivamente.

¹² En este tipo de análisis suelen considerarse varios valores para el parámetro β (Gigliariano y Mosler, 2009) con el fin de observar la sensibilidad de los resultados ante la variación del mismo (IPCC, 1996b).

$$f(y) = \frac{y}{\gamma(1+\gamma)}, \quad h(t;\bar{t}) = \left(\frac{t}{\bar{t}}\right)^{1+\gamma} - 1, \quad w_g = \frac{N_g}{N} \left(\frac{\bar{s}^g}{\bar{s}}\right)^{1+\gamma} \quad y \quad g = 1, \dots, G.$$

De igual modo, se puede obtener la descomposición del índice GEM₋₁ como

$$GEM_{-1}(\mathbf{X}) = B_{-1}(\mathbf{X}) + W_{-1}(\mathbf{X}),$$

donde los componentes de desigualdad interregional e intrarregional, respectivamente, son los siguientes:

$$B_{-1}(\mathbf{X}) = f \left(\sum_{g=1}^G \frac{N_g}{N} h(\bar{s}^g, \bar{s}) \right),$$

$$W_{-1}(\mathbf{X}) = \sum_{g=1}^G w_g f \left(\frac{1}{N_g} \sum_{i \in g} h(s_i, \bar{s}^g) \right),$$

considerando que

$$f(y) = y, \quad h(t;\bar{t}) = \log\left(\frac{t}{\bar{t}}\right), \quad w_g = \frac{N_g}{N} \quad g = 1, \dots, G.$$

Finalmente, y procediendo como en los dos casos anteriores, el índice GEM₀ satisface la descomposición:

$$GEM_0(\mathbf{X}) = B_0(\mathbf{X}) + W_0(\mathbf{X}),$$

donde la desigualdad intergrupos se puede expresar a partir de la expresión:

$$B_0(\mathbf{X}) = f \left(\sum_{g=1}^G \frac{N_g}{N} h(\bar{s}^g, \bar{s}) \right),$$

y la desigualdad intragrupos viene dado por el siguiente término:

$$W_0(\mathbf{X}) = \sum_{g=1}^G w_g f \left(\frac{1}{N_g} \sum_{i \in g} h(s_i, \bar{s}^g) \right),$$

siendo

$$f(y) = y; \quad h(t;\bar{t}) = \left(\frac{t}{\bar{t}}\right) \log\left(\frac{t}{\bar{t}}\right); \quad w_j = \frac{N_j \bar{s}^j}{N \bar{s}} \quad g = 1, \dots, G.$$

Por último, en todos los casos se cumple lo siguiente:

$$s_i = \left(\sum_{j=1}^K \delta_k x_{ij}^{-\beta} \right)^{-1/\beta} \quad i \in g, \quad \bar{s}^g = \frac{1}{N_g} \sum_{i \in g} s_i, \quad \bar{s} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N s_i.$$

Gigliarino y Mosler (2009) proponen diferentes maneras de obtener un índice de polarización a partir de la descomposición de las medidas multidimensionales planteadas con anterioridad, GEM_γ , GEM_{-1} y GEM_0 , en las componentes interregional (*between groups*) e intrarregional (*within groups*).

Así, manteniendo la notación previa, utilizaremos tres especificaciones diferentes para los índices de polarización:¹³

$$P_1(\mathbf{X}) = \phi \left(\frac{B(\mathbf{X})}{W(\mathbf{X}) + c} \right) \cdot S(\mathbf{X})$$

$$P_2(\mathbf{X}) = \phi(B(\mathbf{X}) - W(\mathbf{X})) \cdot S(\mathbf{X})$$

$$P_3(\mathbf{X}) = \phi \left(\frac{B(\mathbf{X})}{B(\mathbf{X}) + W(\mathbf{X}) + c} \right) \cdot S(\mathbf{X})$$

teniendo en cuenta que $\phi(X) = X$, dado que $\phi(X)$ debe ser una función continua y estrictamente creciente y,

$$S(\mathbf{X}) = \left[\left(\prod_{g=1}^G \left(\frac{N_g}{N} \right)^{-\frac{N_g}{N}} \right) - 1 \right] \cdot \frac{1}{G-1}$$

con $g = 1, \dots, G$.

4. Datos y Resultados

Los datos que se han utilizado en este análisis han sido extraídos de la base de datos *Climate Analysis Indicators Tool* (CAIT), desarrollada y actualizada por el *World Resources Institute* (WRI, CAIT, 2012). Dado el amplio número de indicadores climáticos que posee, dicha herramienta es idónea para analizar aspectos referentes al cambio climático. Por otro lado, esta

¹³ En este caso se ha considerado el Índice de Entropía. El parámetro c tiene que ser positivo, y depende de los valores de B y W . En este caso, se ha considerado adecuado el valor 0,1.

base de datos permite comparar las emisiones procedentes de los distintos gases de efecto invernadero¹⁴.

Las variables objeto de estudio son las emisiones de los tres principales GEI: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O), medidas en millones de toneladas métricas de dióxido de carbono (MtCO₂e), es decir, todas las emisiones están expresadas en CO₂-equivalente usando los Potenciales de Calentamiento Mundial a 100 años del IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) Second Assessment Report de 1996 (IPCC, 1996b). Se ha utilizado el indicador de emisiones anuales el cual, muestra la cantidad de GEI emitida por un determinado país durante un determinado año.

Dichas variables se han estudiado para los países de los cuales hay información disponible, atendiendo a la clasificación por regiones realizada por la IEA (IEA, 2012)¹⁵. El periodo de tiempo estudiado abarca desde el año 1990 hasta el año 2005¹⁶, siendo éste el último año para el cual el WRI dispone de información sobre las variables objeto de estudio.

A continuación se analiza la distribución de las emisiones de los tres gases contaminantes más importantes –CO₂, N₂O y CH₄– utilizando los índices multidimensionales de entropía generalizada presentados en la sección 3.

Tal y como se ha especificado anteriormente, estas medidas dependen de tres parámetros. El parámetro δ , que asigna el peso de cada GEI dentro del índice, se ha fijado en función de la proporción de emisiones que representaba cada uno de ellos en 1994. Para el parámetro β se han considerado los valores -1, -0,5 y 5, recogiendo así diferentes grados de sustitución entre los distintos contaminantes. Por último, el parámetro γ , que toma los valores 1,5, -1 y 0, permite observar la sensibilidad de los resultados ante variaciones en la ponderación de las diferentes partes de la distribución.

En la Tabla 1 se presentan los índices de desigualdad multidimensionales para los tres principales contaminantes, CO₂, CH₄ y N₂O, durante el periodo 1990-2005.

¹⁴ A pesar de que los datos de las emisiones de GEI se derivan de distintas fuentes no gubernamentales - *International Energy Agency* (IEA, 2010), *Carbon Dioxide Information Analysis Center* (Boden, T.A. et al., 2011), *United States Environmental Protection Agency* (USEPA, 2006b), *Energy Information Administration* (EIA, 2010) y *European Commission, Joint Research Centre (JRC)/PBL Netherlands Environmental Assessment Agency* (European Commission et al., 2009)- dichos inventarios son comparables dado que son realizados siguiendo los métodos de estimación propuestos por las *Directrices del Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2000; 2006) para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero.

¹⁵ En el Anexo I se detalla la clasificación de los países analizados, atendiendo a las regiones contempladas por la IEA.

¹⁶ Se han estudiado los años 1990, 1995, 2000 y 2005 porque los datos de emisiones de gases distintos al CO₂ se encuentran disponibles en intervalos de 5 años.

Los resultados muestran un patrón decreciente en términos de desigualdad durante todo el periodo para los casos en que se pondera en mayor medida a los países más contaminantes (esto es $\gamma = -1$). Bajo este supuesto, se observa que la mayor reducción de las disparidades se produce cuando β toma el valor 5, es decir cuando el grado de sustitución entre los GEI es reducido. Asimismo, cabe destacar la alta variabilidad en los resultados obtenidos ante cambios en el parámetro β . La caída menos significativa, alrededor de un 7 por ciento, se observa cuando los gases son sustitutivos perfectos ($\beta = -1$), mientras que para $\beta = 5$ se cuantifica en un 44 por ciento.

Tabla 1. Evolución de la desigualdad multidimensional de las emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O (1990 - 2005)

Años	$GEM_{1,5}$			GEM_{-1}			GEM_0		
	$\beta = -1$	$\beta = -0,5$	$\beta = 5$	$\beta = -1$	$\beta = -0,5$	$\beta = 5$	$\beta = -1$	$\beta = -0,5$	$\beta = 5$
1990	23,7801	23,7647	24,7883	1,2394	1,2798	1,9381	0,8450	0,8450	0,8251
1995	25,6262	25,6103	31,3914	1,1863	1,1893	1,1235	0,8576	0,8576	0,8551
2000	26,2389	26,2175	30,6565	1,1562	1,1584	1,0873	0,8506	0,8505	0,8427
2005	27,6642	27,6484	31,2384	1,1485	1,1504	1,0678	0,8696	0,8694	0,8329

Fuente: elaboración propia.

Por el contrario, para los escenarios en que los cambios producidos en los países menos contaminantes priman sobre el resto de la distribución ($\gamma = 0$ y $\gamma = 1,5$), se observa un incremento de la desigualdad de las emisiones de GEI, que es especialmente significativo cuando el parámetro de sensibilidad γ toma el valor 1,5. Nótese que el grueso de este incremento se produce durante la década de los noventa si γ se fija en 1,5; mientras que para la última década del periodo estudiado las tasas de crecimiento son significativamente menores, e incluso, para $\beta = 5$, la desigualdad global en las emisiones de GEI disminuye.

La evolución de las medidas de entropía generalizada cuando a γ se le asigna el valor 0 depende en gran medida del parámetro β . Si bien en todos los casos se observa un incremento de la desigualdad internacional en emisiones, su cuantía difiere sustancialmente entre índices, siendo mayor cuanto menor es el valor del parámetro β . De hecho, cuando este parámetro es igual a 5, la desigualdad apenas se incrementa un uno por ciento, mientras que para el resto de marcos normativos los incrementos se sitúan alrededor de 3 puntos porcentuales. Asimismo, si se desagrega la variación anterior por décadas, vemos que en estos casos el mayor incremento se produce en los últimos diez años, periodo en el las disparidades se reducen notablemente si consideramos que β toma el valor 5.

Para analizar la descomposición de la desigualdad, y así obtener información más detallada acerca de la desigualdad de emisiones de GEI a nivel mundial, consideramos la población en diferentes subgrupos. En este sentido se ha considerado adecuado utilizar las regiones propuestas por la IEA que han sido consideradas en estudios previos (Duro, 2010). Las regiones consideradas en este estudio son OCDE América, OCDE Asia Oceanía, OCDE Europa, No-OCDE Europa y Eurasia, África, Asia, China, No-OCDE América y Oriente Próximo.

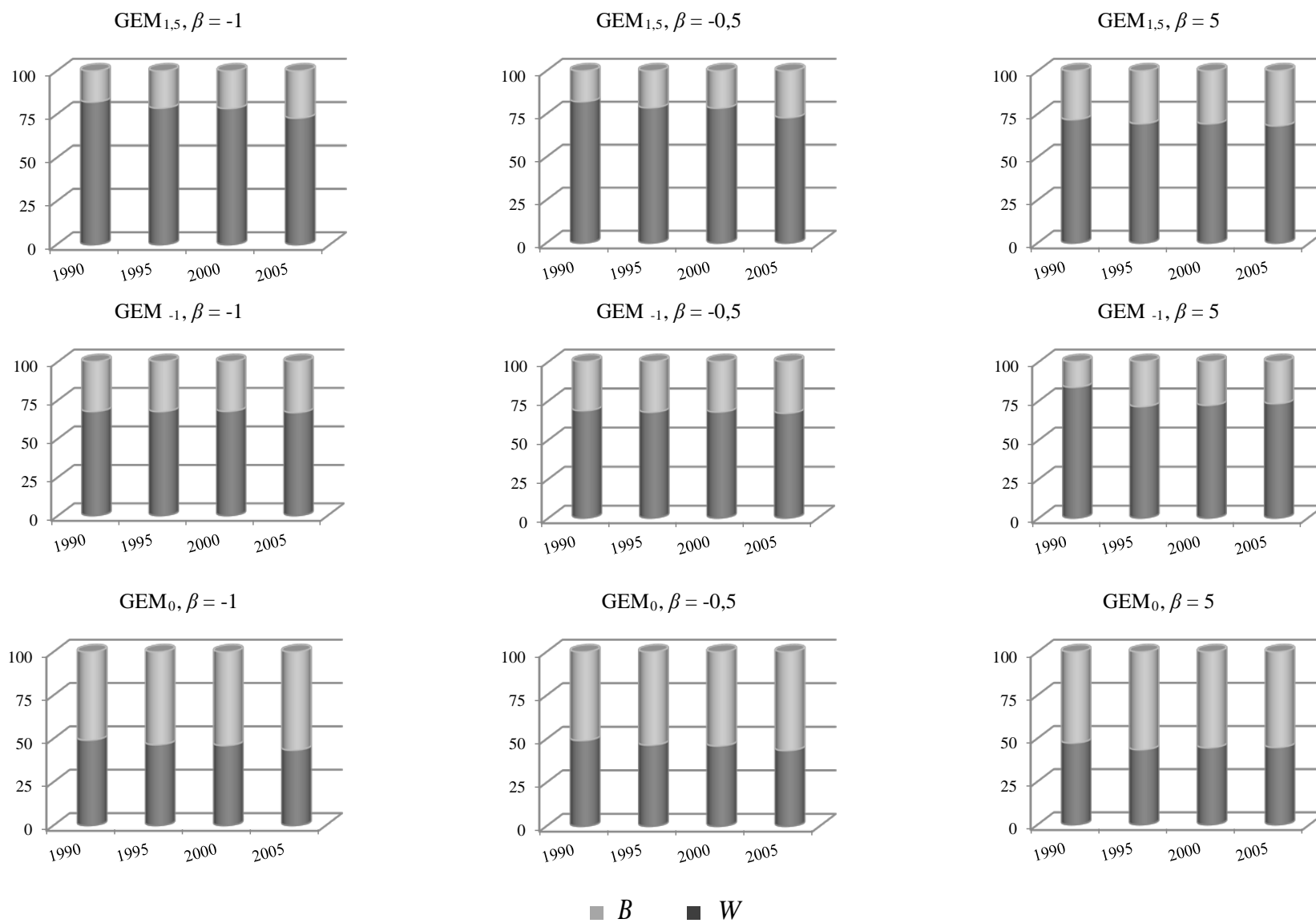
La descomposición de las medidas de entropía generalizada permite distinguir entre las componentes interregional e intrarregional. La desigualdad entre regiones considera solamente las diferencias entre la desigualdad media de cada región, mientras que la segunda componente refleja la desigualdad entre los países que pertenecen a un mismo grupo.

Los resultados referentes a la descomposición de las medidas de entropía generalizada por regiones se presentan en la Tabla 2. En la Figura 1 se ilustra el porcentaje que representa cada componente de desigualdad sobre la desigualdad total.

Tabla 2. Descomposición de las medidas de entropía generalizada según los grupos de la AEI

Años	<i>GEM</i> _{1,5}					
	$\beta = -1$		$\beta = -0,5$		$\beta = 5$	
	<i>B</i> _{1,5}	<i>W</i> _{1,5}	<i>B</i> _{1,5}	<i>W</i> _{1,5}	<i>B</i> _{1,5}	<i>W</i> _{1,5}
1990	0,4029	0,8366	0,4028	0,877	0,3193	1,6187
1995	0,3862	0,8001	0,3861	0,8032	0,3239	0,7996
2000	0,3747	0,7816	0,3745	0,7839	0,3047	0,7826
2005	0,3813	0,7672	0,3811	0,7693	0,288	0,7797
Años	<i>GEM</i> ₋₁					
	$\beta = -1$		$\beta = -0,5$		$\beta = 5$	
	<i>B</i> _{1,5}	<i>W</i> _{1,5}	<i>B</i> _{1,5}	<i>W</i> _{1,5}	<i>B</i> _{1,5}	<i>W</i> _{1,5}
1990	0,4300	0,415	0,4299	0,4151	0,4358	0,3893
1995	0,4591	0,3985	0,4590	0,3986	0,4845	0,3706
2000	0,4594	0,3912	0,4593	0,3913	0,4679	0,3748
2005	0,4926	0,377	0,4924	0,377	0,4611	0,3718
Años	<i>GEM</i> ₀					
	$\beta = -1$		$\beta = -0,5$		$\beta = 5$	
	<i>B</i> _{1,5}	<i>W</i> _{1,5}	<i>B</i> _{1,5}	<i>W</i> _{1,5}	<i>B</i> _{1,5}	<i>W</i> _{1,5}
1990	4,2675	19,513	4,2665	19,498	7,028	17,7603
1995	5,5005	20,126	5,5000	20,11	9,6442	21,7473
2000	5,6907	20,548	5,6891	20,528	9,4413	21,2152
2005	7,5467	20,118	7,5445	20,104	9,9972	21,2412

Figura 1. Descomposición de las medidas de entropía generalizada en los componentes entre y dentro de los grupos



Se puede concluir que en todos los casos la desigualdad intrarregional es un factor predominante, que representa más de un 65 por ciento de la desigualdad total cuando γ toma los valores 1,5 y 1, y en torno al 50 por ciento cuando dicho parámetro se fija en cero.

Asimismo, se observa que, con independencia del peso asignado a las diferentes partes de la distribución, la desigualdad interregional se ha incrementado durante el periodo de estudio, mientras que la desigualdad interna de las regiones disminuye o bien se mantiene prácticamente constante (en los casos en los que γ es igual a 1,5). Como consecuencia, el componente intrarregional ha ido progresivamente disminuyendo su proporción respecto a la desigualdad total en favor del componente interregional. Sin embargo, se observa que en la mayor parte de los supuestos considerados, son las diferencias internas en términos de emisiones las que determinan la evolución de la desigualdad global.

El análisis anterior pone de manifiesto que no es posible establecer conclusiones taxativas sobre la evolución de la desigualdad global de emisiones.

Los patrones observados dependen en gran medida del valor asignado a los parámetros asociados a las medias de entropía generalizada, lo que implica que su evolución está estrechamente ligada a las relaciones que asumamos que existen entre los gases considerados (definido por el parámetro β), así como del peso asignado a los cambios entre los países menos contaminantes (lo que se refleja a través del parámetro γ).

No obstante, es posible señalar algunas tendencias generales. Por un lado, a medida que la relación de sustitución va perdiendo fuerza (β elevado), menores son los incrementos en las disparidades de emisiones de GEI a nivel mundial. Además, cuanto mayor es el peso asignado a la parte baja de la distribución (mayores valores del parámetro γ), mayores son los incrementos observados en la desigualdad internacional de emisiones. Asimismo, las medidas calculadas para las emisiones a nivel país de los gases CO₂, CH₄ y N₂O son extremadamente sensibles a los cambios en la parte baja de la distribución, ya que cuando γ se fija en 1,5 estos índices proporcionan valores entre 23 y 30, mientras que para los demás casos apenas superan la unidad. Por último, la desigualdad interregional ha ido progresivamente aumentando su proporción respecto a la total en detrimento del componente intrarregional.

Una vez analizada la evolución de la desigualdad en las emisiones de GEI, desde un enfoque multidimensional, se estudia la distribución de las emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O

en el periodo 1990-2005, utilizando las medidas de polarización detalladas en la sección 3.

La Tabla 3 muestra el grado de polarización multidimensional, cuantificado mediante el índice P_1 , en las emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O para diferentes valores que toma γ (1,5, -1 y 0) con la finalidad de estudiar la sensibilidad de los resultados ante variaciones en la ponderación de las diferentes partes de la distribución. Asimismo, se consideran diferentes valores para β (-1, 0,5 y 5), recogiendo diferentes grados de sustitución entre los GEI estudiados.

Tabla 3. Grado de polarización multidimensional de las emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O cuantificado a través del Índice P_1 (1990-2005)

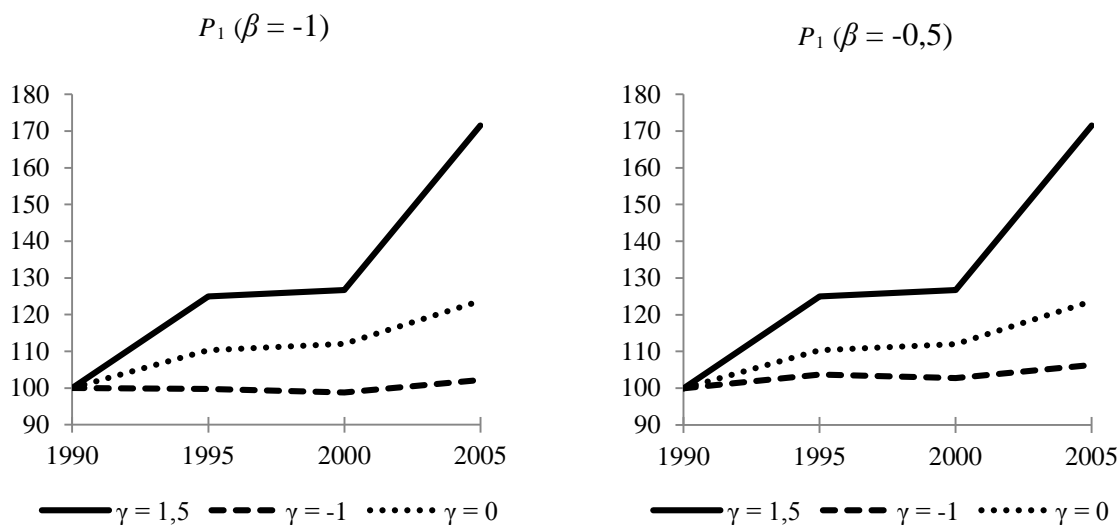
Años	$\gamma = 1,5$			$\gamma = -1$			$\gamma = 0$		
	$\beta = -1$	$\beta = -0,5$	$\beta = 5$	$\beta = -1$	$\beta = -0,5$	$\beta = 5$	$\beta = -1$	$\beta = -0,5$	$\beta = 5$
1990	0,1532	0,1533	0,2770	0,3028	0,2903	0,1308	0,5877	0,5875	0,6271
1995	0,1915	0,1916	0,3108	0,3021	0,3010	0,2535	0,6483	0,6481	0,7248
2000	0,1940	0,1942	0,3118	0,2992	0,2983	0,2430	0,6585	0,6582	0,6938
2005	0,2628	0,2629	0,3298	0,3096	0,3087	0,2305	0,7272	0,7267	0,6880

Fuente: elaboración propia.

El hecho de suponer que el grado de sustitución entre los contaminantes no es elevado – esto es, asignar un número positivo elevado al parámetro β –, no parece muy razonable cuando los organismos internacionales utilizan medidas que los hace directamente comparables. Por este motivo, en la Figura 2 se ilustra la evolución de la polarización multidimensional P_1 en las emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O cuando el parámetro β toma los valores -1 y -0,5, dejando de lado la ilustración para el caso en el que β es igual a 5. Se ha tomado como referencia de análisis el año 1990.

Los resultados muestran un patrón de comportamiento similar cuando los contaminantes mantienen una relación perfecta de sustitución ($\beta = -1$) y cuando dicho grado de sustitución va disminuyendo ($\beta = -0,5$). Por tanto, la evolución de la polarización en las emisiones de GEI parece ser robusta a relaciones de sustitución elevadas entre contaminantes.

Figura 2. Evolución de la polarización multidimensional mediante el Índice P_1 (1990-2005)



Fuente: elaboración propia.

La polarización en ambos escenarios aumenta con independencia de la ponderación otorgada a las distintas partes de la distribución. Si bien, en ambos casos, la polarización experimenta un incremento más significativo cuando $\gamma = 1,5$, esto es, cuando pondera en mayor medida a los países menos contaminantes, aumentándose en torno a un 70 por ciento. En el lado opuesto, cuando se asigna más peso a los países más contaminantes, el grado de polarización sufre un leve incremento, entre un 2 y un 6 por ciento.

Cabe destacar que, a pesar de que en los tres casos la polarización se ha incrementado, la evolución sigue distintos patrones. Mientras que para $\gamma = 0$ y $\gamma = -1$ el crecimiento es constante a lo largo de todo el periodo, para $\gamma = 1,5$, éste se dispara en los últimos 5 años estudiados.

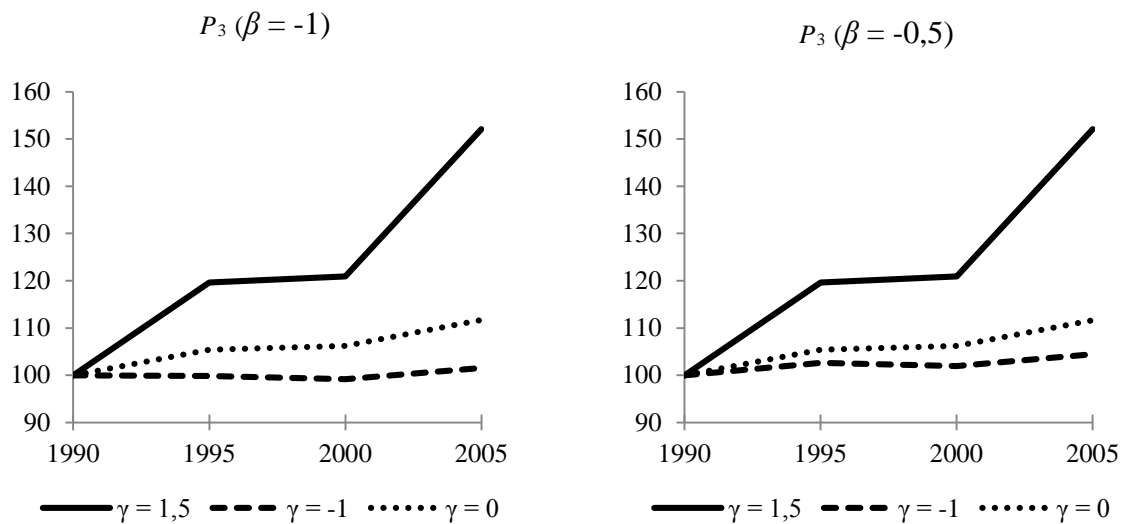
A continuación, se estudia el grado de polarización a partir del índice de polarización P_3 , expuesto en la sección anterior. Los resultados se muestran en la Tabla 4, acompañados de la Figura 3, la cual ilustra la evolución experimentada, en términos porcentuales con respecto al primer año de estudio, por la polarización multidimensional para este último índice considerado ($\beta = -1$ y $\beta = -0,5$).

Tabla 4. Grado de polarización multidimensional de las emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O cuantificado a través del Índice P_3 (1990-2005)

Años	$\gamma = 1,5$			$\gamma = -1$			$\gamma = 0$		
	$\beta = -1$	$\beta = -0,5$	$\beta = 5$	$\beta = -1$	$\beta = -0,5$	$\beta = 5$	$\beta = -1$	$\beta = -0,5$	$\beta = 5$
1990	0,1258	0,1259	0,1988	0,2118	0,2055	0,1103	0,3203	0,3203	0,3317
1995	0,1505	0,1506	0,2156	0,2114	0,2108	0,1864	0,3375	0,3374	0,3571
2000	0,1521	0,1522	0,2161	0,2100	0,2095	0,1807	0,3403	0,3402	0,3494
2005	0,1914	0,1914	0,2246	0,2150	0,2146	0,1737	0,3577	0,3576	0,3480

Fuente: elaboración propia.

Figura 3. Evolución de la polarización multidimensional mediante el Índice P_3 (1990-2005)



Fuente: elaboración propia.

Los resultados obtenidos sugieren un aumento de la polarización de las emisiones de GEI de larga duración en el periodo 1990-2005. Como observábamos al analizar el índice de polarización P_1 a medida que se asigna mayor peso a los países menos contaminantes, el aumento de la polarización es más elevado, superior al 50 por ciento, con independencia del grado de sustitución entre los gases considerados. Del mismo modo, se observa de nuevo que para $\gamma = 1,5$ el grueso del incremento de la polarización se produce en el último lustro. Sin embargo, los incrementos del índice P_3 son un 25 por ciento superiores a los experimentados por el primero.

5. Conclusiones

En este trabajo se analiza la desigualdad en las emisiones de los tres principales GEI (CO₂, CH₄ y N₂O) desde una perspectiva multidimensional para las regiones contempladas por la International Energy Agency en el periodo 1990-2005. Para ello, se emplean las medidas de entropía generalizada, propuestas por Maasoumi (Econometrica, 54, 991-997, 1986) que permiten descomponer la desigualdad total en los componentes de desigualdad entre y dentro de los grupos.

Los datos utilizados en este análisis han sido extraídos de la base de datos *Climate Analysis Indicators Tool* (CAIT), desarrollada y actualizada por el *World Resources Institute* (WRI, CAIT, 2012). Las emisiones están expresadas en CO₂-equivalente usando los Potenciales de Calentamiento Mundial a 100 años del IPCC Second Assessment Report de 1996 (IPCC, 1996).

Los índices de desigualdad multidimensionales para los tres principales contaminantes, durante el periodo de tiempo estudiado muestran que los resultados obtenidos varían en función del peso asignado a las diferentes partes de la distribución.

Así, cuando se pondera en mayor medida a los países más contaminantes, se observa una tendencia decreciente de la desigualdad durante todo el periodo. Por el contrario, para los escenarios en que los cambios producidos en los países menos contaminantes priman sobre el resto de la distribución, la desigualdad en las emisiones de GEI se incrementa.

La descomposición de las medidas de entropía generalizada en los componentes de desigualdad interregional e intrarregional se ha realizado considerando las regiones de países propuestas por la International Energy Agency: OCDE América, OCDE Asia Oceanía, OCDE Europa, No-OCDE Europa y Eurasia, África, Asia, China, No-OCDE América y Oriente Próximo.

Los resultados referentes a la descomposición de las medidas de entropía generalizada por grupos de población permiten concluir que en todos los casos la desigualdad intrarregional es un factor predominante. Asimismo, se observa que, con independencia del peso asignado a las diferentes partes de la distribución, el componente intrarregional ha ido progresivamente disminuyendo su proporción respecto a la desigualdad total en favor del componente interregional. Sin embargo, se observa que en la mayor parte de los supuestos considerados, son las diferencias internas en términos de emisiones las que determinan la evolución de la desigualdad global.

Con respecto al análisis de polarización, de manera general, se aprecia un incremento en todos los casos analizados. Cabe destacar el aumento del 72%, correspondiente al caso en que se pondera en mayor medida a los países que menos contaminan.

En términos generales, se puede concluir un aumento tanto de la desigualdad como de la polarización en el periodo de estudio, cuando se otorga mayor peso a los países menos contaminantes.

El análisis anterior pone de manifiesto que no es posible establecer conclusiones taxativas sobre la evolución de la desigualdad y la polarización de emisiones de GEI a nivel mundial, ya que los patrones observados dependen en gran medida de las relaciones asumidas entre los gases considerados.

Sin embargo, en relación a las políticas ambientales se puede señalar lo siguiente. Por un lado, el compromiso alcanzado en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, celebrada en 1992, de adoptar medidas para controlar las emisiones de los GEI, puede ser una de las causas que se esconden detrás de la evolución decreciente de la desigualdad en las emisiones de los países más contaminantes hasta el año 2005. En este sentido, un estudio similar que cubra un periodo de tiempo mayor podría mostrar los efectos de la entrada en vigor del Protocolo de Kioto en el año 2005 sobre la desigualdad desde una perspectiva multidimensional.

Por otro lado, la expansión de tecnologías bajas en emisiones puede ser una medida a tener en cuenta para atenuar el incremento observado en la polarización de emisiones entre los países que menos contaminan.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Ministerio de Economía y Competitividad (Proyecto ECO2010-15455), y al Ministerio de Educación (AP-2010-4907) por la financiación parcial de este trabajo.

Bibliografía

Alcántara, V. y Duro, J.A. (2004): “Inequality of energy intensities across OECD countries: a note”, *Energy Policy*, 32, p.1257-1260.

Duro, J.A. (2010): “Decomposing international polarization of per capita CO₂ emissions”, *Energy Policy*, 38(11), p.6529-6533.

Duro, J.A. y Padilla, E. (2008): “Analysis of the International Distribution of Per Capita CO₂ Emissions using the Polarization Concept”, *Energy Policy*, 36, p.456-466.

Boden, T.A., Marland, G. y Andres. R. J. (2011): *Global, Regional, and National Fossil Fuel CO₂ Emissions*. Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC). Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy. Oak Ridge, Tenn., U.S.A. doi 10.3334/CDIAC/00001_V2011. Disponible en: http://cdiac.ornl.gov/trends/emis/overview_2008.html

Cantore, N. y Padilla, E. (2010): “Equality and CO₂ emissions distribution in climate change integrated assessment modeling”, *Energy*, 35, p.298-313.

Comité Intergubernamental de Negociación de una Convención Marco sobre el Cambio Climático (1992): Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. En: *Informe del Comité Intergubernamental de Negociación de una Convención Marco sobre el Cambio Climático sobre la labor de la segunda parte del quinto período de sesiones, celebrado en Nueva York del 30 de abril al 9 de mayo de 1992*. Naciones Unidas, Nueva York.

EIA –U.S Energy Information Administration– (2010): *International Energy Statistics*. Washington, DC: U.S. Department of Energy. Disponible en: <http://tonto.eia.doe.gov/cfapps/ipdbproject/IEDIndex3.cfm?tid=90&pid=44&aid=8>

European Commission, Joint Research Centre (JRC)/PBL Netherlands Environmental Assessment Agency (2009): *Emission Database for Global Atmospheric Research (EDGAR)*, release version 4.0. Disponible en: <http://edgar.jrc.ec.europa.eu>, 2009.

Ezcurra, R. (2007): “Is there cross-country convergence in carbon dioxide emissions?”, *Energy Policy*, 35 (2), p.363-1372.

Gigliarano, C. y Mosler, K. (2009): “Constructing indices of multivariate polarization”, *Journal of Economic Inequality*, 7(4), p.435-460.

Groot, L. (2010): “Carbon Lorenz curves”, *Resource and Energy Economics*, 32, p.45-64.

Hedenus, F. y Azar, C. (2005): “Estimates of trends in global income and resource inequalities”, *Ecological Economics*, 55, p.351-364.

Heil, M.T. y Wodon, Q.T. (1997): “Inequality in CO₂ emissions between poor and rich countries”, *Journal of Environment and Development*, 6, p.426-452.

Heil, M.T. y Wodon, Q.T. (2000): “Future inequality in CO₂ emissions and the impact of abatement proposals”, *Environmental and Resource Economics*, 17, p.163-181.

IEA –International Energy Agency– (2010): *CO₂ Emissions from Fuel Combustion 2010 edition*. OECD, Paris. Disponible en: <http://data.iea.org/ieastore/statslisting.asp>

IEA –International Energy Agency– (2012): *CO₂ Emissions from Fuel Combustion Highlights 2012 Edition*, OCDE, Paris.

IPCC –Intergovernmental Panel on Climate Change– (1990): *Climate Change 1990: The IPCC Scientific Assessment*. Contribution of Working Group II to the First Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 1990. Houghton, J.T., Jenkins, G.J. y Ephraums, J.J., (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.

IPCC –Intergovernmental Panel on Climate Change– (1996a): *Climate Change 1995: Economic and social Dimensions of Climate Change*. Contribution of Working Group III to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 1996. Bruce, J. P., Lee, H. y Haites, E.F., (eds.). Cambridge University Press, Cambridge.

IPCC –Intergovernmental Panel on Climate Change– (1996b): *Climate Change 1995: The Science of Climate Change*. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 1996. Houghton, J.T., Meira Filho L.G., Callander, B.A., Harris, N., Kattenberg, A. y Maskell, K., (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC –Intergovernmental Panel on Climate Change– (2000): *Good practice guidance and uncertainty management in national greenhouse gas inventories*. Disponible en: www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/english

IPCC –Intergovernmental Panel on Climate Change– (2001): Technical Summary: A Report Accepted by Working Group I of the IPCC but not approved in detail. A product

resulting from The Third Assessment Report of Working Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change, January 2001. Disponible en: www.ipcc.ch

IPCC –Intergovernmental Panel on Climate Change– (2006): *IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories*. Disponible en: www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html

IPCC –Intergovernmental Panel on Climate Change– (2007a): *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007. Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor M. y Miller, H.L., (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC –Intergovernmental Panel on Climate Change– (2007b): *Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 104 págs.

IPCC –Intergovernmental Panel on Climate Change– (2007c): *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007. Parry, M.L., Canziani, O.F., Palutikof, J.P., van der Linden, P.J., y Hanson, C.E., (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Kandlikar, M. (1995): “The relative role of trace gas emissions in greenhouse abatement policies”, *Energy Policy*, 23, p.879–83.

Lashof, D.A. y Ahuja, D.R. (1990): “Relative contributions of greenhouse gas emissions to global warming”, *Nature*, 344, p.529-531.

Mahony, T.O., “Decomposition of Ireland’s carbon emissions from 1990 to 2010: An extended Kaya identity”, *Energy Policy* (2013), <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2013.04.013>

Manne, A.S. y Richels, R.G. (2001): “An alternative approach to establishing trade-offs among greenhouse gases”, *Nature*, 410, p.675–7.

- Manning, M., Reisinger, A. y Bodeker, G. (2009): *Global Warming Potentials and alternative metrics*. New Zealand Climate Change Research Institute, School of Government, Victoria University of Wellington. Wellington, New Zealand.
- Maasoumi, E. (1986): “The Measurement and Decomposition of Multidimensional Inequality”, *Econometrica*, 54(4), p.991-997.
- Maasoumi, E. y Nickelsburg, G. (1988): “Multivariate Measures of Well-Being and an Analysis of Inequality in the Michigan Data”, *Journal of Business and Economic Statistics*, 6, p.327-334.
- Naciones Unidas (1998): Protocolo de Kioto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Disponible en: <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>
- Padilla, E. y Serrano, A. (2006): “Inequality in CO₂ emissions across countries and its relationship with income inequality: a distributive approach”, *Energy Policy*, 34, p.1762-1772.
- Rasmussen, N. (1975): *WASH-1400 The Reactor Safety Study*. WASH 1400, Nuclear Regulatory Commission, USA.
- Rodhe, H. (1990): “A comparison of the contribution of various gases to the greenhouse effect”, *Science*, 248, p.1217-1219.
- Santamaría Antonio, J. (2010): “Forzamiento radiativo y cambios químicos en la atmósfera”, *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 104(1), p.149-173.
- Shine, K.P., Fuglestedt, J.S., Hailemariam, K., y Stuber, N. (2005): “Alternatives to the global warming potential for comparing climate impacts of emissions of greenhouse gases”, *Climatic Change* 68, pp. 281–302.
- Shine, K.P., Berntsen, T.K., Fuglestedt, J.S., Bieltvedt Skeie, R. y Stuber, N. (2007): “Comparing the climate effect of emissions of short- and long-lived climate agents”, *Philosophical Transactions of The Royal Society A*, 365, p.1903–14.
- Sun, J.W. (2002): “The decrease in the difference of energy intensities between OECD countries from 1971 to 1998”, *Energy Policy*, 30, p.631-635.

Tol, R.S.J., et al., (2008): *Metrics for Aggregating the Climate Effect of Different Emissions: A Unifying Framework*. Economic and Social Research Institute, Dublin, Ireland.

USEPA –U.S. Environmental Protection Agency– (2006a): *Global Mitigation of Non-CO₂ Greenhouse Gases*. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency. Office of Atmospheric Programs. Disponible en: [http://www.epa.gov/climatechange/ Downloads/EPAactivities/GlobalMitigationFullReport.pdf](http://www.epa.gov/climatechange/Downloads/EPAactivities/GlobalMitigationFullReport.pdf)

USEPA –U.S. Environmental Protection Agency– (2006b): *Global Anthropogenic Emissions of Non-CO₂ Greenhouse Gases 1990-2020 (Revised)*. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency. Disponible en: <http://www.epa.gov/nonco2/econ-inv/international.html>.

USEPA –U.S. Environmental Protection Agency– (2012): *Global Anthropogenic Non-CO₂ Greenhouse Gas Emissions: 1990-2030*. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency. Office of Atmospheric Programs. Disponible en: http://www.epa.gov/climatechange/Downloads/EPAactivities/EPA_Global_NonCO2_Projections_Dec2012.pdf

Victor, D.G. (1990): “Calculating greenhouse budgets”, *Nature*, 347, 431 (04 October 1990); doi:10.1038/347431a0

WMO –World Meteorological Organization– (2012): *Greenhouse Gas Bulletin (GHG Bulletin) - N°8: The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2011*.

WRI, CAIT –World Resources Institute, Climate Analysis Indicators Tool– (2012): *CAIT Version 9.0*. Washington, DC: World Resources Institute. Disponible en: <http://cait.wri.org>

Anexo I. Clasificación de los países analizados por grupos de la
Agencia Internacional de Energía (IEA, 2012)

OCDE América: Canadá, Chile, Estados Unidos de América y México.
OCDE Asia Oceanía: Australia, Corea, Israel, Japón y Nueva Zelanda
OCDE Europa: Alemania, Austria, Bélgica, Dinamarca, Eslovaquia, Eslovenia, España, Estonia, Finlandia, Francia, Grecia, Hungría, Irlanda, Islandia, Italia, Luxemburgo, Noruega, Países Bajos, Polonia, Portugal, Reino Unido, República Checa, Suecia, Suiza y Turquía.
No-OCDE Europa y Eurasia: Albania, Armenia, Azerbaiyán, Bielorrusia, Bosnia y Herzegovina, Bulgaria, Chipre, Croacia, Georgia, Gibraltar*, Kazajstán, Kirguistán, Kosovo*, Letonia, Lituania, Macedonia, Malta, Moldavia, Montenegro**, Rumanía, Rusia, Serbia**, Tayikistán, Turkmenistán, Ucrania, Unión Soviética*, Uzbekistán y Yugoslavia*.
África: Angola, Argelia, Benín, Botsuana, Camerún, Congo, Costa de Marfil, Egipto, Eritrea, Etiopía, Gabón, Ghana, Kenia, Libia, Marruecos, Mozambique, Namibia, Nigeria, República del Congo, Senegal, Sudáfrica, Sudán, Tanzania, Togo, Túnez, Zambia, Zimbabue y Otra África (incluye: Burkina Faso, Burundi, Cabo Verde, Chad, Comoras, Gambia, Guinea, Guinea-Bissau, Guinea Ecuatorial, Lesoto, Liberia, Madagascar, Malawi, Mali, Mauricio, Mauritania, Níger, República Centroafricana, Reunión*, Ruanda, Sáhara Occidental, Santo Tomé y Príncipe, Seychelles, Sierra Leona, Somalia*, Suazilandia, Uganda* y Yibuti)
Asia: Bangladesh, Brunei, Camboya, China Taipéi*, Filipinas, India, Indonesia, Malasia, Mongolia, Myanmar, Nepal, Pakistán, República Democrática de Corea, Singapur, Sri Lanka, Tailandia, Vietnam y Otra Asia (incluye Afganistán, Bután, Camboya*, Fiyi, Islas Cook, Islas Salomón, Kiribati, Laos, Macao*, Maldivas, Mongolia*, Nauru, Niue, Nueva Caledonia*, Palaos, Papúa Nueva Guinea, Polinesia Francesa*, Samoa, Timor Oriental*, Tonga y Vanuatu)
China: República Popular de China y Hong Kong (China).
No-OCDE América: Antillas Holandesas, Argentina, Bolivia, Brasil, Colombia, Costa Rica, Cuba, Ecuador, El Salvador, Guatemala, Haití, Honduras, Jamaica, Nicaragua, Panamá, Paraguay, Perú, República Dominicana, Trinidad y Tobago, Uruguay, Venezuela y Otra No-OCDE América (incluye Antigua y Barbuda, Aruba*, Bahamas, Barbados, Belice, Bermudas*, Dominica, Granada, Guadalupe*, Guyana, Guyana Francesa*, Islas Caimán*, Islas Malvinas*, Islas Turcas y Caicos*, Islas Vírgenes*, Isla de la Martinica*, Montserrat*, Puerto Rico*, San Cristóbal y Nieves, Santa Lucía, San Pedro y Miquelón*, San Vicente y las Granadinas y Surinam).
Oriente Próximo: Bahréin, Irán, Iraq, Jordania, Kuwait, Lebanon, Omán, Qatar, Arabia Saudí, Siria, Emiratos Árabes Unidos y Yemen.

(*) Países no incluidos en el análisis debido a falta de datos. (**) Serbia y Montenegro se han estudiado de forma conjunta.