Economía de los biocombustibles líquidos*

Ricardo Guerrero

Universidad de La Laguna

Gustavo A. Marrero

Universidad de La Laguna

Luis A. Puch

Universidad Complutense e ICAE

Resumen

Los biocombustibles líquidos tienen un importante papel a jugar en el proceso de sustitución de combustibles fósiles por energías renovables. Dos de las cuestiones de mayor trascendencia para este proceso son la seguridad en el suministro de combustibles y la reducción de las emisiones causantes del calentamiento global. En el artículo utilizamos el análisis económico para discutir estas dos cuestiones a nivel agregado. Por un lado, utilizamos la teoría de carteras eficientes para sugerir estrategias de diversificación de los riesgos asociados al suministro de energía para el transporte. Por otro lado, utilizamos la teoría económica y el análisis de datos de panel para cuantificar en qué medida el uso de biocombustibles puede contribuir a la reducción de las emisiones de CO₂. El análisis que desarrollamos exige una comprensión del entorno tecnológico y económico en el que se desenvuelven los biocombustibles líquidos al que nos referimos brevemente en primer lugar.

Palabras clave: biocombustibles líquidos, dependencia energética, emisiones, análisis económico.

Clasificación JEL: E32, E37, Q43, Q58.

Abstract

Biofuels have an important role to play in the process of replacing fossil fuels by renewable energies. Two key issues are the increase in energy security and the reduction of greenhouse gas emissions that are expected from that process. In this paper we use economic theory and econometrics to analyze quantitatively these two issues at the aggregate level. On the one hand, we implement efficient portfolio theory to suggest strategies for the diversification of risks associated to transport sector's fuel inputs. On the other hand, we use growth theory and panel data econometrics to quantify the extent to which biofuels can contribute to mitigation of CO₂ emissions. These analyses require an understanding of the state of the technology and the economic environment for biofuels which are both described first.

Keywords: biofuels, energy dependence, emissions, economic theory and econometrics.

JEL classification: E32, E37, Q43, Q58.

* Los autores agradecen los comentarios de José M. Martínez Duart, Gustavo Nombela, Francisco Ramos y Johannes Von Stritzky, así como las sugerencias de un revisor anónimo y del editor. Agradecemos también a Manuel A. García su excelente ayuda en esta investigación.

1. Introducción

El análisis económico en materia de biocombustibles líquidos (*o biocarburantes, o agrocombustibles*) es por supuesto multidimensional. Desde el punto de vista de la economía agregada, la primera cuestión relevante es la determinación de la demanda de combustibles, notablemente en un sector como el del transporte dominado por la dependencia energética del petróleo. La segunda cuestión se refiere a los impactos ambientales fundamentalmente vinculada a la preocupación por el cambio climático. Al centrarnos en las cuestiones agregadas dejamos al margen el análisis de aspectos relativos a la organización industrial vinculados a la dinámica de creación y destrucción de empresas en el sector, o a la posición de estas empresas en la cadena de valor en relación a sus competidores y como input para otros agentes económicos y sectores industriales.

En este artículo analizamos el papel de los cambios en el *mix* de combustibles en la diversificación del riesgo de costes en el transporte y en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Para ello, por un lado, evaluamos el coste medio y la volatilidad de costes de combinaciones alternativas de combustibles utilizando la Teoría de Carteras Eficientes. Por otro lado, nos basamos en una versión del modelo de Solow extendido con emisiones (véanse Brock y Taylor, 2010; Álvarez *et al.*, 2006, y Marrero, 2010) para especificar y estimar para la Unión Europea una ecuación dinámica de datos de panel que relacione las emisiones de CO₂ en el sector transporte con el *mix* de combustible y otras variables de control. Consideramos que estas dos propuestas independientes entre sí, se complementan bien para poner de manifiesto la importancia del papel que los biocombustibles líquidos pueden jugar en la transición desde el uso de combustibles fósiles hacia el uso de energías renovables en el transporte. Puesto que nuestro análisis exige una comprensión del entorno tecnológico y económico en el que se desenvuelven los biocombustibles, describimos dicho entorno en primer lugar.

Respecto a la primera propuesta, la gestión del riesgo de costes, la Teoría de Carteras Eficientes (Markowitz, 1952, y Luenberguer, 1998) ha sido ampliamente utilizada en finanzas y aplicada después a la industria energética en el ámbito de la generación eléctrica (Awerbuch, 2000; Marrero y Ramos-Real, 2010; Marrero *et al.*, 2011, o Roques *et al.*, 2008). La idea es que no sólo el coste medio de cada alternativa energética ha de tenerse en cuenta sino también el riesgo asociado, medido a partir de las fluctuaciones agregadas de los costes de producción. En nuestra aplicación nos centramos en los costes de los distintos inputs para los combustibles utilizados en el sector transporte. Este enfoque, a pesar de ser muy estilizado, permite cuantificar dimensiones muy importantes de la gestión de riesgos en el sector transporte. En particular, la sustitución de combustibles fósiles por biocombustibles líquidos resulta en reducciones importantes de la volatilidad de costes sin afectar al coste medio cuando miramos al total del *mix* (cartera) de combustibles. Además, dicha sustitución resulta en una disminución de las emisiones que depende del coste que se asigne a los derechos de emisión de CO₂.

Respecto a la segunda propuesta, la proliferación de bases de datos homogéneas para países sobre consumo energético y emisiones (Eurostat, AIE, FMI, etcétera) ha fomentado los trabajos que usan datos de paneles dinámicos en el estudio de la relación entre emisiones, energía y economía (Metcalf, 2008; Halkos, 2003; Huang *et al.*, 2008; Marrero, 2010, y González y Marrero, 2012). Para un conjunto de veintiséis países europeos, entre 1991 y 2007, estimamos un modelo dinámico que relaciona las emisiones de CO₂ del transporte por carretera en función del PIB, del consumo energético en el sector y de los cambios en el *mix* de combustibles (gasolina, gasoil y biocombustibles).

Nuestros resultados cuantitativos ponen de manifiesto el extraordinario papel que pueden jugar los biocombustibles que sean respetuosos con el medio ambiente para la seguridad de suministro y para mitigar las emisiones, especialmente a corto y medio plazo. Especialmente esto es así por la gran dependencia que tiene el sector transporte de los combustibles fósiles y el enorme peso que dicho sector tiene en las emisiones de CO₂.

La principal crítica a los biocombustibles se centra en su baja efectividad en términos de emisiones y en los aún elevados costes de producción y utilización que suponen. No obstante, Ajanovic y Haas (2010) sugieren que la situación para los biocombustibles 1G bajo las condiciones de promoción actuales en la UE es prometedora, y que las mayores expectativas están puestas en biocombustibles 2G avanzados para los que se espera que converjan en costes con los 1G para 2030. En este marco de costes, y bajo expectativas de mejora en el balance de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) *well-to-wheel* (es decir, desde el inicio de la producción del combustible hasta su consumo), nuestros resultados para la economía agregada pueden servir de incentivo a la inversión en biocombustibles, e incluso justificar políticas que subvencionen su uso y algunas inversiones a costes moderados.

Este trabajo se estructura como sigue. La sección siguiente describe el estado de la tecnología de producción y comercialización de biocombustibles líquidos, así como el entorno económico en el que esta tecnología se desenvuelve. Dicha descripción incluye una breve referencia al caso de Brasil. La Sección 3 describe los impactos medioambientales directos e indirectos de los biocombustibles líquidos. La descripción del entorno tecnológico, económico y ambiental sirve para motivar las dos piezas del análisis económico de los biocombustibles en las que se centra el artículo. Por un lado, la Sección 4 utiliza la teoría de carteras eficientes para evaluar la gestión de los costes para el sector transporte de los combustibles convencionales y renovables y de la electricidad. Por otro lado, el análisis econométrico de la Sección 5 establece algunas correlaciones y ofrece ciertas predicciones en cuanto a las consecuencias para las emisiones de CO₂ de cambios en el *mix* de combustibles utilizados en el transporte por carretera. La última sección establece las conclusiones.

2. El estado de la tecnología y el entorno económico

El análisis de la economía de los biocombustibles exige caracterizar el estado de la tecnología de producción y utilización de biocombustibles líquidos así como el entorno económico en qué la tecnología se desenvuelve.

2.1. Entorno tecnológico

El estado de la tecnología para la producción y utilización de biocarburantes abarca la producción de la materia prima agrícola y forestal, la producción de biocombustibles a partir de la biomasa, y el rendimiento de los biocombustibles en los motores de los vehículos.

En cuanto a la materia prima, podemos hacer una distinción entre biomasa procedente de cultivos forestales y de cultivos agrícolas. Los cultivos forestales de madera se realizan en bosques modificados con una mayor densidad de árboles. La madera obtenida se utiliza generalmente para la producción de calor o de electricidad, y por ello en este artículo no nos referimos a dicha tecnología. Por el contrario, en el caso de los cultivos agrícolas, la bioenergía se obtiene principalmente de la caña de azúcar y el maíz, destinados a la producción de etanol. Otras plantas como el girasol y la soja se utilizan para la producción de biodiésel. El rendimiento por hectárea de los cultivos energéticos varía en función del tipo de cultivo y ha ido creciendo notablemente. Por ejemplo, desde 1960, se ha producido un incremento de rendimiento del 70 por 100 para la caña de azúcar y el 400 por 100 para el maíz (FAOSTAT, 2007). Un rendimiento que se considera rentable es el de unas diez a doce toneladas de biomasa seca por hectárea y año, lo que equivale a unos 220 GJ/Ha.

En cuanto a la producción de biocombustibles líquidos a partir de la biomasa resulta adecuado hacer una distinción entre biocombustibles de primera, segunda y tercera generación (1G, 2G y 3G respectivamente). El Cuadro 1 resume estos distintos tipos, así como sus principales características y la posición en el ciclo de la I+D+i en la que se encuentran.

CUADRO 1
PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES LÍQUIDOS: CARACTERÍSTICAS Y ESTADO DEL DESARROLLO
DE LAS DISTINTAS TECNOLOGÍAS

Tipo de biocombustible	Características	Desarrollo en término de I+D+i
Bioetanol 1G	Utilización directa en algunos motores de combustión preparados para ello o mezcla con combustibles fósiles (E10).	Fase de competición, se producen sin ayudas en algunos casos, aunque a menudo existen medidas de promoción a la producción.
	Más utilizado actualmente a nivel mundial.	
	Se obtiene de productos agrícolas también destinados a la alimentación.	
Biodiésel 1G	Segundo más utilizado a nivel mundial.	Fase de competición. Tanto por costes y volumen de producción, se considera al bioetanol 1G en una situación más avanzada que el biodiésel 1G.
	Se obtiene a partir de aceites vegetales procedentes de semillas oleaginosas de soja, colza, girasol, palma.	
	Los azúcares necesarios para su producción se obtienen a partir de biomasa celulósica.	
Etanol ligno-celulósico 2G	La producción de su biomasa es más sostenible, abundante y barata y no compite con las cosechas alimenticias.	Aún muy lejos de ser competitivo. Fase precomercial con mínima introducción en el mercado.
	Biodiesel sintético o avanzado que se produce a partir de la biomasa ligno-celulósica.	
Biodiésel 2G	Se basa en la obtención de hidrógeno a partir de la biomasa.	En una posición de introducción en el mercado más avanzada que el etanol ligno-celulósico, aunque aún muy lejos de ser competitivo.
Hidrógeno de biomasa 3G	Biocombustible procedente de las algas.	Fase pionera, aunque el proceso con hidrógeno puede que se encuentre más cerca de ser introducido en el mercado.
Biodiesel de microalgas 3G	El esfuerzo principal se centra en las microalgas, dada su alta concentración de lípidos.	Fase pionera, la tecnología se encuentra alejada aún de la puesta en funcionamiento de prototipos.

FUENTE: GUERRERO *et al.*, 2010.

La cuestión clave se refiere a la sostenibilidad que proporciona el uso de residuos celulósicos en el caso de los 2G frente al uso de productos agrícolas que requiere la biomasa para los 1G. En todo caso, el rendimiento por hectárea de los cultivos energéticos varía en función del tipo de cultivo y ha ido creciendo notablemente en el tiempo. Además, se estima que menos de un 1 por 100 del suelo dedicado a la agricultura se destina a cultivos energéticos (IEA Bioenergy, 2009). En particular, la Agencia Internacional de la Energía (*International Energy Agency*, IEA ETP, 2008), ha estimado los rendimientos medios aproximados para la producción de bioetanol 1G (panel izquierdo) y biodiésel 1G (panel derecho) para varias regiones geográficas como resume el Cuadro 2. El mayor rendimiento se obtiene para la caña de azúcar en Brasil, con las importantes consecuencias a las que nos referiremos brevemente al hablar del entorno económico a continuación.

CUADRO 2
RENDIMIENTO MÁXIMO DE LAS COSECHAS DE BIOMASA SECA Y ENERGÍA OBTENIDA

Materia prima	Región	lge/ha	Materia prima	Región	lde/ha
Caña de azúcar	Brasil	4.490	Colza (FAME)	Europa	1.080
Caña de azúcar	Media mundial	3.630	Soja/colza (FAME)	EEUU	720
Remolacha	Europa	3.300	Colza (FAME)	Brasil	630
Maíz	Norteamérica	1.980	Ligno-celulosa	Mundial	3.000
Trigo	Europa	1.650	Lípidos de microalgas	Mundial	11.863 (lge)

FUENTE: Elaboración a partir de Bioenergy IEA (2009).

Finalmente, en relación al rendimiento de los motores como resultado de la implementación de los biocombustibles líquidos, lo más ilustrativo es sin duda referirnos a la posición de la frontera tecnológica mediante el estudio de caso de Brasil como hacemos en la Sección 2.2 a continuación.

2.2. *Entorno económico*

El entorno económico de los biocarburantes está marcado fundamentalmente por la evolución del precio del petróleo en los mercados internacionales. El Gráfico 1 muestra dicha evolución desde los *shocks* petroleros de los años 70. El equilibrio entre mercado y regulación es especialmente complicado en dicho entorno. No sólo es que confluyen los intereses diversos de petroleras, compañías de automoción (aviación, barcos) y eléctricas en el marco de las complejas relaciones entre tecnología,

combustible y demanda de transporte. Además, en el caso de los biocombustibles se manifiesta también el *lobby* agrícola y buena parte de las relaciones comerciales entre el Norte-Sur. El escenario se complica aún más si tenemos en cuenta el gran número de agentes ávidos de proyectos bajo el paraguas gubernamental que intervienen revestidos de estrategias *greenwashing*, que a menudo quedan en simples logos verdes. En este escenario: ¿dónde están las fuerzas del mercado? ¿Dónde queda el papel de árbitro del regulador?

GRÁFICO 1
EVOLUCIÓN DEL PRECIO DEL BARRIL DE PETRÓLEO WEST TEXAS
EN DÓLARES NOMINALES Y REALES
(Ajustado por la inflación medida por el deflactor del PIB en EEUU)

FUENTE: Elaboración propia.

Aunque el análisis sea complejo, la evidencia del transporte acerca del tamaño del problema es demoledora. El Cuadro 3 ofrece algunos datos sobre consumo energético y emisiones en el sector transporte (total y por carretera) para España, EEUU, y Alemania. Una lectura rápida de los datos nos ayuda a entender la dimensión del problema que existe en el sector transporte en relación a las emisiones generadas y a su intensidad en consumo energético.

CUADRO 3
ESCENARIO MACROECONÓMICO, TENDENCIAS DEL TRANSPORTE
Y SUS EMISIONES

	España			EEUU			Alemania		
	1995	2007	Crec. anual 95-07	1995	2007	Crec. anual 95-07	1995	2007	Crec. anual 95-07
PIB (billones 2000 US\$, PPA aj.)	701	1.084	3,7	7.973	11.468	3.1	1.929	2.315	1,5
Pasajeros carretera (millones/km)	251.189	402.456	4,0	3.899.426	4.486.974	1.2	883.800	933.384	0,5
Mercancías carreteras y tren (millón tm/km)	112.293	264.891	7.4	3.415.938	4.507.819	2,3	308.015	458.054	3,4
Emisiones de CO ₂ (Mt), total	250	381	3,6	5.270	5.915	1,0	890	830	-0,6
Emisiones de CO ₂ (Mt), transporte	87	152	4,7	1.666	1.954	1,3	189	180	-0,4
Porcentaje, % total	35,0	39,9		31,6	33,0		21,2	21,7	
Emisiones transporte en carretera	61	101	4,2	1.258	1.528	1,6	160	141	-1,0
Porcentaje, % transporte	70,1	66,1		75,5	78,2		84,6	78,3	

FUENTE: International Transport Forum (ITF) y AIE, 2009.

De los tres países que mostramos en esta tabla el caso de España destaca en relación al incremento del sector transporte hasta 2007. España registró importantes aumentos en su PIB real entre 1995 y 2007 (antes de la crisis). También lo hizo EEUU y en mucha menor medida Alemania. Pero España ha sido el único país en el que las emisiones del sector transporte han crecido claramente por encima del PIB. Parte de la explicación se debe a los aumentos de la movilidad en España. Por ejemplo, si lo comparamos con EEUU, cuyo aumento del PIB también ha sido elevado, destaca el grandísimo incremento de la movilidad en España, tanto en pasajeros como en mercancías. Los aumentos de movilidad en España han más que duplicado a los de EEUU. Si lo comparamos con Alemania las diferencias son mucho mayores. Claramente esto ha tenido una implicación inmediata en las emisiones en el sector. Mientras que las emisiones en España en el sector transporte han crecido anualmente más de un 4,5 por 100 (algo más de un 4 por 100 en el transporte por carreteras), en EEUU el aumento anual se queda en torno al 1,5 por 100.

Mientras que España es un claro ejemplo de un mal comportamiento de las emisiones en el sector transporte, Alemania es un ejemplo del caso contrario (algo menos en EEUU). En Alemania la movilidad de pasajeros ha sido pequeña (un 0,5 por 100 anual), aunque la de transporte de mercancías ha crecido por encima de la de EEUU, y casi la mitad que en España. Pero las mayores diferencias se aprecian cuando miramos a las emisiones en el sector transporte. En Alemania las emisiones en el sector transporte por carretera han caído a una tasa anual del 1 por 100 entre 1995 y 2007 y algo menos en el transporte en general. Es cierto que España presenta frente a Alemania factores estructurales en contra: ausencia de canales navegables y baja densidad de la red ferroviaria. Pero detrás del mejor comportamiento alemán (y de EEUU en menor grado) tiene que haber aspectos relacionados con eficiencia y ahorro energético y sabemos también que los hay relacionados con una mayor penetración del consumo de biocombustibles en el consumo final del transporte.

En relación a este último aspecto y centrándonos en los países europeos, cuya muestra será la utilizada en el análisis cuantitativo de la Sección 6, el Gráfico 2 muestra la evolución del peso de los biocombustibles sobre el total de combustibles líquidos en el sector transporte por carretera. Se aprecia claramente como Alemania está tomando el liderazgo del cambio en el *mix* de combustibles en Europa. Francia y Suecia están siguiendo la estela de Alemania, aunque la penetración de los biocombustibles ha comenzado con algo de retraso. Por su parte, países como Italia, España y Reino Unido se están quedando rezagados en este cambio. La incidencia de este retraso en materia de contención de las emisiones puede ser importante, tal y como concretaremos en la Sección 5.

GRÁFICO 2
CONSUMO FINAL DE BIOCOMBUSTIBLES RESPECTO DEL TOTAL.
SECTOR TRANSPORTE POR CARRETERA

FUENTE: Elaboración propia a partir de datos Eurostat.

Finalmente, el caso del etanol en Brasil es un claro ejemplo de éxito y viabilidad económica en el uso de biocombustibles para el sector transporte (Almeida *et al.*, 2007). El Gráfico 3 muestra la producción de etanol en Brasil desde 1970, donde se aprecia la expansión inicial asociada a los shocks del petróleo, el relativo estancamiento desde mediados de los ochenta hasta la crisis asiática y el resurgimiento desde 2001 con tasas de crecimiento similares a la de los años setenta. Dichas fases se explican fundamentalmente por la evolución de los precios del petróleo que recogía el Gráfico 1 anterior, y también por los cambios de política y en el entorno internacional (Guerrero *et al.*, 2010). Las políticas diseñadas han incentivado tanto la producción de grandes cantidades de caña de azúcar, como la generación de etanol y la producción y comercialización de vehículos que lo usen. Dichos incentivos parecen haber acompañado adecuadamente las señales de precios en los mercados relevantes: azúcar, vehículos y petróleo. Para ello, ha sido necesario alcanzar una alta productividad en la producción de caña de azúcar y de etanol, desarrollar los vehículos flexibles (Flex) que permitan el uso de gasolina o etanol indistintamente, y un conjunto de medidas fiscales que favoreciendo la competitividad del etanol frente a la gasolina a nivel nacional no resulten demasiado distorsionantes.

La situación actual en Brasil se caracteriza por la liberalización del mercado de carburantes y el desarrollo del mercado internacional del etanol, el nuevo entorno de precios altos del petróleo, y muy especialmente, la generalización de vehículos

GRÁFICO 3
EVOLUCIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE ETANOL EN BRASIL

FUENTE: Elaboración propia a partir de datos IEA.

de combustible flexible (Flex). La tecnología Flex reduce enormemente el riesgo asociado a cambios en el precio relativo de etanol/gasolina (mayor diversificación), y elimina los problemas de suministro de etanol. La decisión entre consumir etanol y gasolina se reduce por tanto a una decisión relacionada con los precios relativos entre gasolina y etanol, y no a una decisión de adquisición del tipo de vehículo, que es más costosa, más arriesgada y más de medio plazo.

En contraposición al panorama prometedor que sugiere la frontera tecnológica para los biocombustibles en Brasil, en algunos casos, y en particular en los meses anteriores al estallido de la crisis actual, se ha puesto en cuestión la sostenibilidad futura de los biocombustibles por su impacto sobre el precio de los alimentos básicos. La evidencia agregada (World Bank, 2009; Guerrero *et al.*, 2010, entre otros) sugiere que es más bien el mal funcionamiento del mercado del petróleo y la escasa planificación energética por parte de los importadores lo que vincula biocombustibles y precios de los alimentos básicos, un vínculo que se sitúa al margen de la causalidad directa¹. En todo caso, es difícil descartar potenciales impactos grandes a escala local

¹ La relación entre los precios energéticos y agrícolas parece estrecharse a medida que los primeros son más altos. Unos precios del crudo por encima de 50 US\$/barril determinan los precios del maíz, mientras que por debajo de ese precio juegan otras variables. Al mismo tiempo, unos precios del petróleo elevados incentivan la producción de biocombustibles que se vuelven competitivos frente a los combustibles fósiles. Esta coincidencia ha provocado que aparezca una correlación entre biocombustibles y precios alimenticios, pero la evidencia de causalidad es muy débil.

y de manera episódica, por lo que la apuesta de futuro ha de ser el desarrollo de los biocombustibles de segunda generación, cuyo conflicto con los alimentos es mucho más reducido. Pero hasta que llegue su pleno desarrollo, los de primera generación tendrán que tomar el liderazgo en el corto-medio plazo, y en esto, una evaluación adecuada de los impactos ambientales directos e indirectos es fundamental.

3. Impactos medioambientales

Las emisiones del transporte representan alrededor de la cuarta parte del total de GEI que se emiten a la atmósfera. Para que las emisiones se vean reducidas es imprescindible que el petróleo deje de representar el 95 por 100 de todos los combustibles utilizados en el transporte. La contribución de los biocombustibles a este proceso se estima en términos de la reducción de emisiones respecto a las de los combustibles fósiles desde que se extraen hasta que se utilizan en automoción. El Gráfico 4 resume los valores que manejan distintos autores y organismos (IEA, 2010) en cuanto a la reducción de GEI desde el inicio de producción del combustible hasta su consumo, lo que se denomina *well-to-wheel*, tanto para combustibles de primera (1G) como de segunda generación (2G).

GRÁFICO 4
REDUCCIÓN DE EMISIONES *WELL-TO-WHEEL* DE DISTINTOS TIPOS DE BIOMASA UTILIZADOS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL Y BIODIESEL

FUENTE: Sustainable Production of Second-Generation Biofuels (2010).

Entre los biocombustibles 1G se observa que el bioetanol producido a partir de la caña de azúcar tiene unas emisiones muy reducidas. El bioetanol de trigo puede presentar en algunos casos excelentes resultados (IEA Bioenergy, 2009), mientras que el bioetanol de maíz en EEUU aporta muy poco a la reducción de GEI. Los biocombustibles lignocelulósicos (2G) presentan también bajas emisiones, especialmente como consecuencia de la utilización de prácticamente la totalidad de la planta vegetal: lo que para los biocombustibles 1G se consideran residuos. Utilizar residuos implica que la ocupación de suelo es cero y que las emisiones por uso de fertilizantes desaparecen, lo que resulta en que no sólo no se emite CO_2 sino que se consigue que los cultivos correspondientes lo retiren de la atmosfera. La Directiva 2009/28/CE les dobla su contribución para la mitigación de emisiones GEI.

El coste de la reducción de los gases de efecto invernadero debido a la utilización de distintas clases de biocombustibles se puede estimar combinando los costes de los biocombustibles con las emisiones GEI (mediante el análisis del ciclo de vida, ACV), comparándolos a una base común correspondiente a la gasolina. Evidentemente, este mismo tipo de información se puede utilizar para evaluar el efecto de los precios del carbono emitido en los costes relativos de los distintos biocombustibles. En el Gráfico 5 se representa el coste incremental de varios combustibles alternativos en función de su potencial de mitigación en CO_2 -eq. (IEA ETP, 2010). En el gráfico se ha asumido un precio del petróleo de 120 \$/barril. El coste de los biocombustibles incluye la producción y el transporte de la biomasa, su conversión a biocombustible, y su almacenamiento y transporte hasta la estación de servicio. Como conclusión de los datos expuestos en el gráfico, se deduce que los biocombustibles de segunda generación, y algunos de primera, constituyen una solución efectiva para un futuro a corto plazo en ciertas regiones.

GRÁFICO 5
FUENTES DE REDUCCIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO
EN EL SECTOR TRANSPORTE

FUENTE: Energy Technology Perspectives 2010. Scenarios and Strategies to 2050. International Energy Agency, 2010.

El cálculo de ahorro de GEI es en efecto un proceso complejo. Los sistemas de medición deben contemplar aspectos diversos como los fertilizantes o plaguicidas utilizados, o el combustible consumido por tractores y otros vehículos implicados en producción y transporte. Esto hace que las medidas de las emisiones en biocombustibles sean mucho más elaboradas que en otras energías renovables. La medición de la sostenibilidad de los biocarburantes implica los cambios que la producción de biocarburantes produce en el carbono almacenado en el suelo y cómo contribuirá a reducir las emisiones GEI. Además, la consecución del objetivo de reducción de emisiones de CO₂ puede tener ciertos efectos, generalmente adversos, que se denominan co-impactos, sobre otras variables medioambientales, como son la utilización de terrenos (agrícolas o forestales) y el consumo de agua.

Sin embargo, la realidad es que en el Mundo sólo aproximadamente el 2 por 100 de los terrenos arables se utiliza para la obtención de biocombustibles (UNEP, 2009). Además, el 90 por 100 de la producción de biocombustibles está localizada en muy pocas áreas geográficas: Estados Unidos, Brasil y algunos países de la UE, entre ellos España. Aunque en efecto algunos biocombustibles de primera generación hacen un uso importante de suelo, unos 20 m²/Lge, especialmente el biodiésel procedente de la soja y del girasol, el bioetanol por ejemplo requiere una cantidad de terreno agrícola que es aproximadamente la tercera parte.

En relación a la utilización del agua, hay que comparar los impactos negativos de los biocombustibles con los que se generan en la extracción y refino de combustibles fósiles, procesos que consumen una gran cantidad de agua. A este respecto, el bioetanol 1G procedente del maíz en cosechas irrigadas consume en su producción una gran cantidad de agua, casi quince veces la necesaria para la producción de gasolina y unas diez veces más que el utilizado en el biocombustible E85. Sin embargo, tanto el bioetanol 2G, puesto que en su producción se utiliza toda la planta y sus residuos, como los biodiésel, consumen cantidades de agua similares a la gasolina. Wu (2009), entre otros, ilustra la importancia de la medición de la huella en recurso hídrico (WF: *waterfootprint*) en la fabricación de biocombustibles muy por encima de nuestros breves comentarios aquí. Del mismo modo, respecto a los co-impactos sobre el agua, la localización geográfica donde crece la biomasa necesaria para la producción del biocombustible es determinante (IEA ETP, 2010). Lo que es asumible en usos de agua Brasil no lo es en China o India, de ahí la necesidad de desarrollos 2G en algunos países. Más aún, la producción de biomasa para biocombustibles 2G puede presentar impactos positivos con respecto al agua, puesto que permite aumentar la retención de agua de los suelos y con ello evitar en parte la erosión por lluvia y viento, además de ser tolerante a las sequías e influir positivamente en los patrones de lluvia locales.

4. Riesgo de costes: la seguridad de suministro

La dependencia del petróleo que tiene el sector transporte a nivel global es absoluta. Las tensiones en el mercado del petróleo y la volatilidad asociada en los precios de los combustibles fósiles no favorecen la seguridad de suministro. Las alternativas al petróleo son los biocombustibles líquidos y la electricidad. Dichas alternativas están escasamente desarrolladas en la actualidad. Desde el punto de vista económico cabe preguntarse si la gestión eficiente de los riesgos asociados al *mix* de combustibles para el sector transporte sugiere una composición más equilibrada de los distintos inputs energéticos, especialmente de cara al futuro.

En Guerrero *et al.* (2010, 2012) hemos propuesto analizar el papel de cambios en el *mix* de combustibles para la diversificación de riesgos en el sector transporte. La idea es considerar el *mix* energético de manera conjunta y evaluarlo con las técnicas de gestión eficiente de carteras que propone la Mean-Variance Portfolio Theory (véanse Merton, 1952, y Markowitz, 1972). Estas técnicas que son de aplicación ya clásica en finanzas se han aplicado más recientemente para la gestión de carteras de generación eléctrica (Awerbuch, 2000, y Roques *et al.*, 2008). Sin embargo, nuestras aplicaciones a la cartera de combustibles para el sector transporte son las primeras que conocemos en esta literatura.

En este artículo presentamos una ilustración de los resultados para una cartera eficiente a nivel mundial dada la información que proporciona la IEA (2009, 2010) sobre costes medios de las distintas tecnologías y las series temporales de precios de los inputs energéticos de cada una de ellas. A partir de dichas series temporales obtenemos no sólo una medida de la variabilidad individual de los costes de los combustibles del sector transporte, sino además, y lo que es más importante, una medida de las interrelaciones entre los distintos costes. Cuanto menor sea el grado de correlación de sus costes, menor será el riesgo de la cartera. Esta es la idea crucial que la metodología aporta al correcto diseño de la política energética. En este sentido, existen alternativas con altas correlaciones entre ellas, como la gasolina y el diésel, por ejemplo (su correlación sería casi 1). Por su parte, otras combinaciones tendrían correlaciones positivas pero relativamente alejadas de 1, como serían los biocombustibles de producción nacional de primera y segunda generación, o éstos con las importaciones de biocombustible, o incluso entre el coste de la electricidad con los combustibles fósiles, si suponemos que en el *mix* eléctrico hay bastante peso de gas natural. Por último, también podrían existir alternativas con correlación casi nula, como serían los biocombustibles (especialmente los de segunda generación) con la electricidad. En particular al ser estos dos los de menor correlación, su combinación sería la que más ayudaría a reducir el riesgo global de una futura cartera de combustible.

El análisis cuantitativo de los escenarios considerados muestra que la diversificación hacia combustibles no fósiles proporciona una reducción importante de la volatilidad de los costes, es decir del riesgo, sin afectar el coste promedio de la cartera. Más aún, dicha diversificación resulta en una reducción de las emisiones de CO₂ cuya magnitud depende del coste asignado a los derechos de emisión.

La cartera de combustibles vendría definida por los pesos de las distintas posibilidades: convencionales, X_1 ; biocombustible 1G nacional, X_2 ; biocombustible 1G importado, X_3 ; biocombustible 2G, X_4 ; y vehículo eléctrico, X_5 . Dichos pesos están entre cero y uno, y suman uno, y el coste promedio de la cartera pondera los distintos costes medios por dichos pesos. Dados esos pesos, el coste medio de la cartera energética se define como la media ponderada de los costes individuales:

$$\overline{CC} = \sum_{i=1}^5 X_i \cdot \overline{C}_i \quad [1]$$

Por otro lado, el riesgo de la cartera depende de la volatilidad individual década uno de los costes ponderada por el cuadrado de su peso en la cartera y de la evolución conjunta de esos costes que refleja su matriz de covarianzas. Además, incorporamos al problema de decisión límites tecnológicos para cada posibilidad. A corto-medio plazo los límites son: $0,5 < X_1 < 1$, $0 < X_2 < 0,2$, $0 < X_3$, $X_4 < 0,1$, y $0 < X_5 < 0,15$. A largo plazo los límites son más flexibles: $0 < X_1 < 1$; $0 < X_2 < 1$; $0 < X_3 < 0,20$; $0 < X_4 < 1$; $0 < X_5 < 1$. El objetivo de esta sección es principalmente ilustrativo, con la intención de remarcar el papel de la diversificación en la reducción del riesgo y de sus implicaciones en el coste medio y en las emisiones. Por eso estos límites los debemos de considerar como orientativos y mirar tan sólo a los resultados cualitativos, los cuales cambian muy poco al modificarlos.

Considerados los costes medios, las varianzas de costes individuales, las correlaciones entre los costes de las distintas alternativas y los límites tecnológicos, el Cuadro 4 muestra que la cartera de Mínimo Coste (MC) sobre la Frontera Energética Eficiente estará muy concentrada en los combustibles más baratos: en gasolina si el petróleo es barato (tanto a largo como a corto plazo); o en biocombustibles de primera generación (1G, producción nacional e importación) en el largo plazo si el petróleo es caro. En el otro extremo de la frontera estará la cartera de Mínima Varianza (MV), la cual será una cartera muy diversificada entre las alternativas más complementarias, penalizando a las de alto riesgo individual. Así, el peso de los combustibles convencionales, al ser de los más volátiles individualmente y los que mayor correlación presentan entre ellos, se situará en su mínimo: 50 por 100 en el corto-medio plazo, y 0 por 100 en el largo plazo. Para el resto de alternativas, el menor riesgo se obtiene con una diversificación importante entre la electricidad y los biocombustibles. En el corto-medio plazo, con independencia de considerar un escenario de petróleo barato o caro, los pesos son de un 15 por 100 en biocombustibles de primera generación, un 10 por 100 de segunda, un 10 por 100 de importación y un 15 por 100 de eléctrico. En el largo plazo, la electricidad y los biocombustibles se reparten casi un 50 por 100 cada uno. Eso sí, dentro de los biocombustibles, existe cierta diversificación entre la importación, y la producción de primera y de segunda generación, siendo esta última la que mayor peso se lleva (entre un 20 por 100 y un 30 por 100).

CUADRO 4
CARTERAS EFICIENTES DE COSTE MEDIO-RIESGO DE COSTES DEL MIX DE
COMBUSTIBLES. CUATRO ESCENARIOS: CORTO FRENTE A LARGO PLAZO
TECNOLÓGICO, Y PETRÓLEO BARATO O CARO

	Petróleo barato, corto/plazo			Petróleo barato, largo/plazo		
	MC	MV	Media	MC	MV	Media
Coste, US\$/GJ	13,6	19,7	16,6	13,6	19	16,3
Riesgo (%)	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1
Pesos						
Convencional (Gaso-diésel)	99,4	50	71,5	99,8	0	39,3
Bio, 1. ^a generación	0	15	10,1	0	3,5	18,9
Bio, importación	0,6	10	10	0,2	14,6	20
Bio, 2. ^a generación	0	10	1	0	31,2	11,9
Electricidad	0	15	7,4	0	50,8	9,9
	Petróleo caro, corto/plazo			Petróleo caro, largo/plazo		
	MC	MV	Media	MC	MV	Media
Coste, US\$/GJ	25	27,1	26,1	22,4	22,8	22,6
Riesgo (%)	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Pesos						
Convencional (Gaso-diésel)	80,8	50,1	61,3	0	0	0
Bio, 1. ^a generación	0	15	13,7	72,1	8,4	6
Bio, importación	10	10	10	20	15,1	19,3
Bio, 2. ^a generación	0	9,9	0	0	22	21,9
Electricidad	9,2	15	15	7,9	54,5	52,8

Por último, en el cuadro se muestran los resultados de una cartera media entre la de MC y la de MV. Al igual que la cartera de MV, la cartera promedio también destaca el interés de la coexistencia de los biocombustibles en sus tres formas (1G, importación, y 2G) con el uso de electricidad. Incluso, a largo plazo, y especialmente si el petróleo es caro, esta complementariedad es mucho más intensa, al reducirse enormemente el peso del combustible fósil en estas carteras. Pero aún en el corto-medio plazo y con precios bajos del petróleo (el escenario más favorable para los combustibles fósiles), la cartera MEDIA muestra el interés de usar otras alternativas, como los biocombustibles de primera generación, la importación de etanol y el uso de la electricidad. A medida que miramos a largo plazo y consideramos un escenario de petróleo caro (120USD/barril), las carteras eficientes presentan menores pesos de los combustibles fósiles (incluso llegan a ser nulos), consideran mayores pesos de los biocombustibles de segunda generación, y complementan estos últimos con el uso de la electricidad.

5. Transporte y emisiones: un ejercicio cuantitativo

Tal y como enfatizamos en la Sección 2, Un segundo aspecto clave en el análisis económico de los biocarburantes se refiere a la incidencia que tendría un cambio en el *mix* de combustibles energético sobre las emisiones de CO₂ en el sector transporte por carretera. La eficiencia tecnológica en los vehículos y las medidas de movilidad y de diseño de las ciudades son piezas clave para la reducción de las emisiones que no tratamos en este artículo. El otro aspecto clave es el cambio en el *mix* energético. Para ilustrarlo realizamos un sencillo análisis cuantitativo que relaciona las emisiones de CO₂ en el sector transporte por carretera para una muestra de países de la UE con los cambios en el *mix* de combustibles. Además se incluyen otras variables relevantes que sirvan de control, como son el PIB y el consumo energético agregado, todo ello en términos per cápita. Usamos las series anuales de emisiones de CO₂, de PIB, de población y de consumo energético primario que nos facilita la AIE. Los datos de biocombustibles son los que hemos mostrado en las secciones anteriores. Los datos de consumo de diésel y de gasolina los hemos obtenido de las estadísticas de Eurostat.

El objetivo es cuantificar la importancia que la introducción de biocombustibles en el *mix* de combustibles del transporte ha tenido en las emisiones de CO₂ en los últimos años. Siguiendo a Marrero (2010), especificamos y estimamos un modelo de panel dinámico en el que la variable endógena son las emisiones por habitante (CO₂), y las variables explicativas son el PIB per capita (Y), el consumo energético primario por habitante (E), y los ratios de consumo de diésel y de biocombustibles totales sobre el total, que denotamos por ShD y ShB, respectivamente. Dado que la suma de gasolina, diésel y biocombustibles da el total, en esta ecuación tenemos que omitir uno de los ratios para evitar el problema de multicolinealidad estricta. En nuestro caso, hemos omitido el ratio de la gasolina sobre el total, por lo que los parámetros asociados al diésel y a los biocombustibles están expresados en términos relativos respecto al de la gasolina. Las variables están expresadas en logaritmos excepto los ratios, por lo que los coeficientes de Y o E son elasticidades, y los de los ratios son cuasi-elasticidades.

La ecuación que estimamos es la siguiente:

$$\ln CO2_{it} = \alpha_i + \delta \cdot D_t + \beta \cdot \ln CO2_{it-1} + \gamma_1 \ln Y_{it} + \gamma_2 \ln E_{it} + \gamma_3 ShD_{it} + \gamma_4 ShB_{it} + \varepsilon_{it} \quad [2]$$

Esta especificación de panel dinámico es estándar en la literatura (Arellano y Bond, 1991; Arellano y Bover, 1995, y Blundell y Bond, 1998). El término constante α_i representa los factores fijos en el tiempo y específicos de cada país relacionados con aspectos geográficos, políticos y regulatorios, o de eficiencia energética inicial. D_t es una variable temporal, que recoge los efectos comunes a todos los países pero cambiantes en el tiempo, como shocks energéticos o cambios tecnológicos comunes. El término dinámico de la ecuación permite controlar el modelo frente a la inercia, tanto en las emisiones como en resto de variables, al mismo tiempo que mide el gra-

do de convergencia condicional de las emisiones entre los países analizados para el periodo de tiempo considerado.

Existen diferentes métodos para estimar un modelo de panel como (3). Pero la estructura dinámica del modelo (y por tanto la endogeneidad de uno de los regresores) hace que los métodos tradicionales (usando MCO para el *pool* de datos, o efectos fijos o aleatorios) puedan generar estimaciones sesgadas, por lo que consideramos las alternativas propuestas por Arellano y Bond (1991), GMM-DIF, y por Arellano y Bover (1995) y Blundell y Bond (1998), GMM-SYS, las cuales persiguen evitar los sesgos y ser más eficientes para muestras pequeñas.

El Cuadro 5 resume las estimaciones de estos métodos alternativos para dos muestras distintas: 1990-2007 (total), y 1998-2007 (periodo post-Kyoto).

En primer lugar destacamos que los estadísticos $m1$ y $m2$ de los procedimientos GMM-DIF y GMM-SYS indican que las hipótesis de especificidad de los residuos son correctas. En segundo lugar, si nos fijamos en las estimaciones del coeficiente b según todos los métodos considerados, las diferencias son muy pequeñas. En la práctica, esto es un claro síntoma de que los problemas de sesgos de los métodos tradicionales son pequeños. Además, el pequeño valor del b estimado indicaría que la mayoría de la inercia que presenta la serie de emisiones está siendo explicada por la evolución contemporánea de las variables incluidas en el modelo. Por su parte, cuando comparamos las dos muestras analizadas, sí apreciamos diferencias.

Como otro resultado interesante, también destacamos la alta significación de la variable de consumo energético total en comparación con la del PIB. En general, una vez tenido en cuenta el consumo energético, el PIB tiene muy poco efecto sobre las emisiones. La elasticidad del PIB, en el mayor de los casos es de un 2-3 por 100. Por su parte, el consumo energético, sin llegar a tener una elasticidad igual a la unidad (de hecho siempre es menor), es muy próxima a la unidad, especialmente cuando consideramos todo el periodo temporal. El que la elasticidad asociada al consumo energético agregado se haya reducido en el periodo post-Kyoto es un resultado interesante, ya que indica que ha habido cierta mejoría en la intensidad en emisiones del consumo energético.

Un tercer resultado interesante es el signo asociado al ratio diésel/energía (ShD). De ser cierto que un cambio de gasolina a diésel (proceso de dieselización) ayudaría a reducir las emisiones, hubiésemos obtenido un signo de este coeficiente claramente negativo. Pero los resultados nos indican que o es significativamente igual a cero o, de ser significativo, sería positivo (aunque pequeño). Este resultado es consistente a trabajos recientes de Schipper *et al.* (2002), Schipper y Fulton (2009), Mendiluce y Schipper (2011) o González y Marrero (2012), que apuntan a que el proceso de dieselización ha ocasionado un importante efecto sobre las emisiones de signo contrario motivado por el mayor uso del transporte y la mayor demanda que ha generado la eficiencia de los motores diesel y los beneficios fiscales a este combustible.

Por último, destacamos el resultado objeto de esta sección. Se aprecia que, con independencia del método de estimación y la muestra usada, la incidencia del cambio en el *mix* de combustibles hacia los biocombustibles tiene un efecto muy

CUADRO 5
ELASTICIDADES DE LAS EMISIONES DE CO2 DEL TRANSPORTE POR CARRETERA A CAMBIOS EN LA ACTIVIDAD
ECONÓMICA (PIB), EN EL CONSUMO ENERGÉTICO TOTAL, Y EN LA COMPOSICIÓN DEL MIX DE COMBUSTIBLES
UTILIZADOS, PARA 24 PAÍSES DE LA UE (EUROSTAT 1990-2007)

	1990-2007					1998-200				
	pooled- OLS	Random Effect	Fixed Effect	GMM- DIF	GMM- SYS	pooled- OLS	Random Effect	Fixed Effect	GMM- DIF	GMM- SYS
log(CO2(-1))	0,0607*** (0,0117)	0,0587*** (0,0114)	0,0611*** (0,0111)	0,0634* (0,0352)	0,0632* (0,0379)	0,218*** (0,0267)	0,2151*** (0,026)	0,1915*** (0,0287)	0,1842** (0,0729)	0,2251** (0,1092)
log(PIB pc)	0,0184*** (0,0049)	0,0189*** (0,0072)	0,0369*** (0,0133)	0,0372 (0,0237)	0,0201** (0,0089)	0,0138 (0,0086)	0,0223* (0,0121)	0,1077*** (0,0292)	0,122 * (0,0761)	0,0158 (0,0312)
log(Energía pc)	0,9215*** (0,0121)	0,9258*** (0,0122)	0,931*** (0,0126)	0,9249*** (0,044)	0,9184 *** (0,0408)	0,7625*** (0,0266)	0,7576*** (0,0264)	0,7399*** (0,0317)	0,7222*** (0,1068)	0,7514*** (0,0942)
Diésel/Energía	0,0561*** (0,0082)	0,0363*** (0,0127)	-0,0288 (0,0214)	-0,058 (0,0755)	0,0203 (0,0414)	0,0423*** (0,0122)	0,0357** (0,0177)	-0,0834 (0,0537)	-0,1089 (0,2094)	0,0097 (0,0676)
Biocomb./Energía	-1,1904*** (0,1293)	-1,1687*** (0,135)	-1,1805*** (0,1385)	-1,3303*** (0,265)	-1,3176*** (0,2599)	-1,1043*** (0,1452)	-1,0678*** (0,1595)	-1,1923*** (0,1846)	-1,313*** (0,3299)	-1,1592*** (0,1688)
R2	0,99	0,99	0,98			0,99	0,99	0,95		
m1-test				-2,8731***	-2,7766***				-2,9563***	-3,0509***
m2-test				-1,5304	-1,6756*				-0,9793	-1,0873

NOTAS: Muestra: 24 países UE, 1990-2007.
Endógena: Emisiones CO₂ transporte por carretera per capita.
Explicativas: PIB pc, Consumo final energía sector transporte por carretera pc, mix (diésel, biocombustibles), dummies temporales, efectos fijos entre 1990 y 2000 hay muchos ceros en las series de biocombustibles.
1998-2007: periodo post-Kyoto.
*, **, ***, ****: significativo al 10%, 5% y 1%, respectivamente.

significativo y de reducción de las emisiones. En todos los casos los coeficientes son siempre negativos y significativos al 1 por 100 y su cuasi-elasticidad supera el 1.0.

Aunque siempre se corre el riesgo de hacer un mal uso de estas estimaciones, al intentar usarlas para hacer previsiones sobre cambios de políticas, lo que sí podemos decir es que para el periodo analizado y el conjunto de países considerados, diferencias en un punto porcentual en el *mix* de combustibles en contra de la gasolina y a favor de los biocombustibles está asociado, en media, a tener algo más de un 1 por 100 menos de emisiones en el sector. Además, la solidez de los resultados nos confiere mayor verosimilitud a la hora de afirmar los beneficios que tiene un cambio en el *mix* de combustibles a favor de los biocombustibles en la reducción de las emisiones de CO₂ en el sector transporte por carretera.

6. Conclusiones

Los biocombustibles líquidos tienen que jugar inevitablemente un papel decisivo en la respuesta general al calentamiento global. La razón fundamental por la que esto es así tiene que ver con el enorme peso que el sector transporte tiene en las emisiones de CO₂. Para ejercer dicho papel solo cuentan los biocombustibles que contribuyen eficazmente a mitigar las emisiones a la vez que son respetuosos con las zonas naturales. Una solución energética sostenible para el sector transporte pasa a corto plazo por la sustitución de gasolina y diesel por bioetanol y biodiesel en las mezclas, y a largo plazo por el vehículo híbrido con motor Flex en la parte de motor de explosión, y que permite el uso de gasolina y etanol indistintamente. Por un lado, la sustitución de combustibles fósiles por biocombustibles ocurre ya en distintas combinaciones en función del estado de la tecnología. Por otro, los motores flex ya están disponibles, y su uso está hoy muy extendido en Brasil. Lo que falta es encontrar las condiciones para que el éxito en Brasil de estos motores pueda extenderse a un buen número de regiones en el resto del mundo. Además, la tecnología Flex de uso de biocombustibles es complementaria con el vehículo eléctrico y puede contribuir a que éste supere el ámbito del transporte urbano a pequeña escala.

Referencias bibliográficas

- [1] AJANOVIC, A. y HAAS, R. (2010): «Economic Challenges for the Future Relevance of Biofuels in Transport in EU countries», *Energy*, 35, pp. 3340-48.
- [2] ALMEIDA, E.; BOMTEMPO, J. V. y SILVA, C. (2007): «The Performance of Brazilian Biofuels: An Economic, Environmental and Social Analysis», en *Biofuels Linking Support to Performance*, OCDE, París.
- [3] ÁLVAREZ, F.; MARRERO, G. y PUCH, L. A. (2005): «Air Pollution and the Macroeconomy across European countries», FEDEA, *Working Paper* 2005-10.

- [4] ARELLANO, M. y BOND, S. (1991): «Some tests of specification for panel data: Monte Carlo evidence and an application to employment equations», *Review of Economic Studies*, 58, pp. 277-297.
- [5] ARELLANO, M. y BOVER, O. (1995): «Another look at the instrumental variable estimation of error-components models», *Journal of Econometrics*, 68, pp. 29-52.
- [6] ATSUMI, S.; HIGASHIDE, W. y LIAO, J. C. (2009): *Nature Biotech*, 27, pp. 1170-77.
- [7] AWERBUCH, S. (2000): «Investing in photovoltaics: risk, accounting and the value of new technology», *Energy Policy*, 28 (14), pp. 1023-1035.
- [8] BLUNDELL, R. y BOND, S. (1998): «Initial conditions and moment restrictions in dynamic panel data models», *Journal of Econometrics*, 87 (1), pp. 115-143.
- [9] BROCK, W. y TAYLOR, M. S. (2010): «The Green Solow Model», *Journal of Economic Growth*, 15 (2), pp. 127-153.
- [10] FAOSTAT (2007): *The State Food and Agriculture – Biofuels*, Roma, FAO.
- [11] GUERRERO, R.; MARRERO, G. A.; MARTÍNEZ-DUART, J. M. y PUCH, L. A. (2010): *Biocombustibles líquidos: Situación actual y oportunidades de futuro para España*, Fundación Ideas, DD 19-2010.
- [12] GUERRERO, R.; MARRERO, G. A. y PUCH, L. A. (2012): «Costs for conventional and renewable fuels and electricity in the worldwide transport sector: a mean-variance portfolio approach», *Energy*, en prensa.
- [13] GONZÁLEZ, R. M. y MARRERO, G. A. (2012): «The effect of dieselization in road transport emissions: the case of Spanish regions between 1998 and 2006», *Energy Policy*, forthcoming.
- [14] HALKOS, G. E. (2003): «Environmental Kuznets Curve for sulphur: evidence using GMM estimation and random coefficient panel data models», *Environment and Development Economics*, 8, pp. 581-601.
- [15] HUANG, B. N.; HWANG, M. J. y YANG, C. W. (2008): «Causal relationship between energy consumption and GDP growth revisited: a dynamic panel data approach», *Ecological Economics*, 67, pp. 41-54.
- [16] IEA: *Bioenergy*, 2009, 2010.
- [17] IEA: *Energy Technology Perspectives*, 2008, 2010.
- [18] IPCC (1997): *Revised 1996 Guidelines for National Greenhouse Gas Inventory*, Intergovernmental Panel on Climate Change, véase también 2006.
- [19] LICHTS, F. O. (2004): *World Ethanol and Biofuels Report*.
- [20] LUENBERGUER, D. G. (1998): *Investment Science*, Oxford University Press.
- [21] MARKOWITZ, H. M. (1952): «Portfolio selection», *Journal of Finance*, 7 (1), pp. 77-91.
- [22] MARRERO, G. A. (2010): «Greenhouse gases emissions, growth and the energy mix in Europe», *Energy Economics*, 32 (6), pp. 1356-1363.
- [23] MARRERO, G. A. y RAMOS-REAL, F. J. (2010): «Electricity generation cost in isolated system: the complementarities of natural gas and renewables in the Canary Islands», *Sustainable and Renewable Energy Reviews*, 14, pp. 2808-2818.
- [24] MARRERO, G. A.; PUCH, L. A. y RAMOS-REAL, F. (2011): «Riesgo y costes en la generación de electricidad», *Política Exterior*, vol. 1, núm. 1, pp. 136-149.
- [25] MENDILUCE, M. y SCHIPPER, L. (2011): «Trends in passenger transport and freight energy use in Spain», *Energy Policy*, 39, 6466-6475.
- [26] MERTON, R. C. (1972): «An analytic derivation of the efficient portfolio frontier», *The Journal of Finance and Quantitative Analysis*, 7, pp. 1851-72.

- [27] METCALF, G. (2008): «An empirical analysis of energy intensity and its determinants at the state level», *The Energy Journal*, 29, 1-26.
- [28] ROQUES, F. A.; NEWBERY, D. M. y NUTTALL, W. J. (2008): «Fuel mix diversification incentives in liberalised electricity markets: A Mean-Variance Portfolio theory approach», *Energy Economics*, 30, pp. 1831-1849.
- [29] SCHIPPER, L.; MARIE-LILLIU, C. y FULTON, L. (2002): «Diesels in Europe. Analysis of Characteristics, usage patterns, energy savings and CO₂ emission implications», *Journal of Transport Economics and Policy*, 36 (2), pp. 305-340.
- [30] SCHIPPER, L. y FULTON, L. (2009): «Disappointed by diesel? The impact of the shift to diesels in Wurope through 2006. Transportation Research Record», *Journal of Transportation Research Board*, 2139, pp. 1-10.
- [31] UNEP (2009): *Towards Sustainable Production and Use of Resources: Assessing Bio-fuels*.
- [32] WORLD BANK (2009): *Global Economic Prospects: Commodities at the Crossroads*. Washington. DC: World Bank.
- [33] WU, M. (2009): *Comparative Water Use in the Production of Ethanol and Petroleum Gasoline*, Energy Systems Division, Argonne National Laboratory.