DOCUMENTOS DE DEBATE

BIOCOMBUSTIBLES LÍQUIDOS: SITUACIÓN ACTUAL Y OPORTUNIDADES DE FUTURO PARA ESPAÑA

Ricardo Guerrero, Gustavo Marrero,
José M. Martínez-Duart y Luis A. Puch

www.fundacionideas.es

DD
19/2010

Las opiniones reflejadas en este documento sólo vinculan al autor y no necesariamente a la Fundación IDEAS.

fundación ideas
para el progreso

Ricardo Guerrero (Universidad de la Laguna y Fedea) es Doctor en Ciencias Físicas (Premio Extraordinario) por la UAM. En febrero de 1999 entró a formar parte del Departamento de Física Básica de la ULL, del cual es Profesor Titular de Universidad. También es Director del Programa de Investigación sobre Energía y Cambio Climático de la Fundación de Estudios de Economía Aplicada. Desde el año 2006 dirige el Máster en Energías Renovables de la Universidad de La Laguna. Su investigación se centra en el campo de las energías renovables, eficiencia energética y tecnologías asociadas.

Gustavo Marrero (Universidad de La Laguna y Fedea) es Doctor en Economía por la Universidad Autónoma de Barcelona. Es Profesor Titular de Análisis Económico de la ULL y Director del Programa de Investigación Focus Abengoa-Fedea sobre Energía y Cambio Climático. Ha participado en numerosos proyectos y contratos de investigación sobre economía, energía y medioambiente del Programa I+D+i Nacional y Autonómicos, y destacan publicaciones en revistas internacionales de la talla del *Energy Economics, Journal of Economic Dynamic and Control, Macroeconomic Dynamics, Journal of Macroeconomics, Journal of Economics, Journal of Forecasting* o el *Economic History Review.*

José M. Martínez-Duart [Universidad Autónoma de Madrid e Instituto Universitario Nicolás Cabrera (UAM)] es Catedrático de Física Aplicada, es Doctor por las Universidades de Pensilvania y UCM, y Máster por la Universidad de Michigan. Su labor más destacada se ha desarrollado en el campo de la Ciencia de los Materiales, con aplicaciones a las Energías Renovables. Ha sido Director del Instituto de Física del Estado Sólido (CSIC), Presidente de la Sociedad Europea de Materiales (E-MRS), Presidente-Fundador de la Sociedad Española de Materiales y Director del Departamento de Física Aplicada (UAM). Tiene unas 300 publicaciones en revistas internacionales de alto índice de impacto, ha escrito 10 volúmenes y libros de texto.

Luis A. Puch (Universidad Complutense de Madrid y Fedea*) es Profesor Titular de Análisis Económico de la UCM y Director del Programa de Investigación Focus Abengoa-Fedea sobre Energía y Cambio Climático. Es Doctor en Economía por la Universidad Carlos III de Madrid y ha sido profesor en CEPREMAP Paris, EUI Florencia, IMT Lucca y en las universidades de Valencia y el País Vasco. Su investigación más reciente se refiere a las consecuencias agregadas de las decisiones de inversión e innovación de las empresas, los procesos de adopción tecnológica y sus implicaciones para el crecimiento económico, el uso de energía y el medioambiente.

*Autor de contacto, Fedea, C/Jorge Juan 46, 28001 Madrid; luis.a.puch@gmail.com

Agradecemos los comentarios de **Carlos Sebastián** y **Johannes von Stritzky.** Agradecemos a **Juan Antolín** y **Manuel García** su excelente ayuda en esta investigación, y a **Carmen Arias** su asistencia en la edición de este documento. Agradecemos también el apoyo financiero del Programa de Investigación Focus Abengoa-Fedea y de la Fundación IDEAS. Este texto se complementa con los apartados recogidos en el Anexo del documento web, disponible en www.fundacionideas.es.

Editado por Fundación IDEAS
c/ Gobelas 31, 28023 Madrid
Telf. +34 915 820 091
Fax. +34 915 820 090
www.fundacionideas.es

ISBN: 978-84-15018-47-6
Depósito legal: M-49654-2010

fundación ideas
para el progreso

Abstract

En esta monografía argumentamos que un futuro del transporte no es viable sin biocombustibles líquidos. El enorme peso que el sector transporte tiene en las emisiones de CO_2 justifica acciones específicas que promuevan el desarrollo de los biocombustibles líquidos como respuesta al calentamiento global. Dichas acciones, que deberían suponer costes moderados, pasan a corto plazo por mantener los compromisos adquiridos respecto a mezclas en torno al 5% hoy y hacia el 10% en 2020, a la vez que se favorece el desarrollo de los vehículos híbridos y del vehículo *flex.* En el largo plazo, y ante un previsible escenario de precios altos del petróleo, valoramos que la mejor manera de reducir un riesgo de costes elevado es la complementariedad de la electricidad y de los biocombustibles de segunda generación como fuentes energéticas para el transporte. La estrategia exige, además de una adecuada gestión agrícola, hídrica y edáfica, el respeto a las zonas naturales, un considerable esfuerzo de I+D, y la internalización de las emisiones vía impuestos al carbono y comercio de derechos. Exige, además, el aprovechamiento de las fuerzas del mercado que operan en los sectores implicados, y una gestión inteligente de sus intereses, a veces ávidos de proyectos bajo el paraguas gubernamental.

Índice

Resumen ejecutivo 9

1. La bioenergía como apuesta tecnológica de futuro 14

1.1 El escenario tecnológico y productivo 15

1.1.1 La materia prima: el rendimiento de las cosechas y la utilización de terrenos agrícolas y forestales 15

1.1.2 La producción de biocombustibles líquidos 17

1.2 El entorno económico 22

1.2.1 Los mercados y el escenario macroeconómico 22

1.2.2 El sector transporte: la necesidad de biocombustibles líquidos 25

2. Biocombustibles para el sector del transporte: el caso de Brasil 28

3. El impacto medioambiental directo e indirecto de los biocombustibles 35

3.1 Emisión y mitigación de gases de efecto invernadero 35

3.2 Utilización de la tierra y del agua 36

3.2.1 Co-impacto medioambiental de la utilización del suelo 36

3.2.2 Co-impacto medioambiental de la utilización del agua 38

3.3 Influencia de los biocombustibles sobre el precio de los alimentos 39

4. Costes actuales y posibilidades para el futuro 41

4.1 Los costes actuales y el escenario para los próximos años 41
4.1.1 Análisis de los costes de la biomasa 41
4.1.2 Análisis de los costes de los biocombustibles 42

4.2 Otras alternativas para el transporte 46
4.2.1 Biocombustibles frente al vehículo eléctrico 46
4.2.2 Biocombustibles frente a otras alternativas 49

4.3 Riesgo de costes en el *mix* de combustibles 51

5. Implicaciones de política económica, energética y medioambiental 56

5.1 Normativas y políticas de promoción 56
5.2 Coordinación de políticas: I+D, mercados y regulación..... 57

6. Conclusiones y recomendaciones 63

Referencias 72

Abreviaturas y siglas

1G: primera generación; **2G:** segunda generación; **3G:** tercera generación.

ACV: análisis del ciclo de vida.

Biodiésel B10: petrodiésel que contiene un 10% de biodiésel

BNDES: Banco Nacional de Desarrollo Económico y Social de Brasil.

BtL o BTL: *Biomass to Liquids.* Procedimiento para obtener biodiésel de segunda generación.

CAFE: *Corporate Average Fuel Economy.*

CHP: *combined heat and power*. Cogeneración de electricidad y calor.

CNE: Comisión Nacional de la Energía.

CO_2-eq: dióxido de carbono equivalente. Concentración de CO_2 equivalente a una concentración dada de GEI en términos de radiación atmosférica.

CSP: *concentrated solar power*. Energía solar de concentración.

CTL: *Coal to Liquids.* Conversión de carbón en combustible líquido como forma de biocombustible; **con CCS:** si la conversión se combina con secuestro de carbono (*Carbon Capture and Storage*).

DOE: Departamento de Energía de Estados Unidos.

E85: Gasohol que contiene un 85% de etanol.

EIA: Oficina de Información Energética (Estados Unidos).

EISA: *Energy Independence and Security Act.*

EJ: exajulio (10^{18} julios).

EPA: Agencia de Protección Medioambiental de los Estados Unidos.

EPO: *European Patent Office.*

ETBE: etil tercbutil éter.

ETP: *Energy Technology Perspectives* de la IEA.

EUETS: *European Union Emissions Trading Scheme.*

FAME: *Fatty Acid Methyl Esters* (Esteres Metílicos de los Ácidos Grasos), es decir, el aceite vegetal denominado biodiésel.

FAO: Organización para la Alimentación y Agricultura.

FEE: Frontera energética eficiente

Gasolina E10: gasolina que contiene un 10% de etanol.

GEI: gases de efecto invernadero.

GJ: gigajulio (10^9 julios).

Gt: gigatonelada.

GTL: *Gas to liquid*. Conversión de gas natural en combustible líquido.

Ha: hectárea.

ISCC: *International Sustainability Carbon Certification.*

ICE: motor de combustión interna.

IEA: *International Energy Agency.* Agencia Internacional de la Energía.

iLUC: cambio de uso indirecto del suelo.

kb: miles de barriles.

kWh: kilovatio hora.

IDAE: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.

lde: litro de diésel equivalente.

LDV: *Light Duty Vehicles*. Vehículos ligeros de bajos consumos.

lge: litro de gasolina equivalente.

MC: mínimo coste.

MPG: millas por galón.

MV: Mínima varianza.

PANER: Plan de Acción Nacional en Energías Renovables.

PHEV: vehículo eléctrico híbrido enchufable.

PPA: paridad de poder adquisitivo.

ppm: parte por millón.

PSM: precio soporte mínimo.

RFS: Programa de *Standard Fuel Renewable.*

SET: *Sustainable Energy Tecnology Reports.* Programa de Investigación Focus Abengoa- Fedea.

SMR: *Steam Methane Reforming.* Proceso de generación de hidrógeno a partir de hidrocarburos más agua reformado con vapor.

SNG (Bio-): *Synthetic Natural Gas (Gas Natural Sintético). Se obtiene a*l mezclar gas licuado del petróleo con aire en proporciones adecuadas.

tep: tonelada equivalente de petróleo.

Tm: tonelada métrica.

VE o EV: vehículo eléctrico

WEO: *World Energy Outlook.*

WF: huella en el recurso hídrico.

Resumen ejecutivo

Una de las cuestiones de mayor trascendencia para la agenda global es el control de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) responsables del cambio climático. En este escenario, la sustitución de las energías fósiles por energías renovables cobra especial relevancia para el cumplimiento de los compromisos medioambientales adquiridos por nuestro país. Las importantes consecuencias derivadas de este nuevo escenario de control de emisiones y sostenibilidad energética reclaman la máxima atención por parte de los estudiosos y de los actores políticos y empresariales.

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 CO_2. 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 diésel por bioetanol y biodiésel, 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.

La tecnología *flex* de uso de biocombustibles es complementaria con el vehículo eléctrico híbrido y puede contribuir a que éste supere el ámbito del transporte urbano a pequeña escala. Vehículo eléctrico híbrido que no está de más decir que a juicio de estos autores se encuentra en una fase de desarrollo y uso bastante más incipiente que lo que ciertos mensajes, procedentes de fuentes diversas, no pre-

cisamente próximas a las iniciativas en materia de energías renovables, parecen transmitir.

Por supuesto, la problemática del sector transporte es lo suficientemente compleja como para que una clarificación de las afirmaciones anteriores exija la redacción de la presente monografía. Al mismo tiempo, el desarrollo de los biocombustibles presenta beneficios adicionales muy importantes y que están relacionados con la seguridad del suministro de combustibles líquidos y con la gestión de los recursos agrícolas, hídricos y edáficos que abordamos también en el documento.

No podemos olvidar que, junto con el reto del cambio climático, **existen amenazas a la estabilidad de los precios energéticos y a la seguridad de suministro de combustible y alimentos**, así como oportunidades para el desarrollo de las economías emergentes, que pasan en buena medida por una gestión eficiente de los recursos naturales. Dicha gestión eficiente se relaciona también con la adopción de políticas que incidan sobre la oferta de combustibles fósiles y no solo sobre la demanda de los mismos. La reducción de la demanda no garantiza que la extracción de petróleo y gas ocurra a una tasa menor.

En esta monografía analizamos la posición de los biocombustibles líquidos frente a estos retos. Lo hacemos en un momento decisivo para los biocombustibles, cuando parecen estar rodeados de enemigos a menudo jaleados por las petroleras, enfrentados al coche eléctrico que surge de repente como si fuera gratis, aparentemente traicionados por su principal valedor, Brasil, ahora inundado de petróleo en campo de Libra, y en plena resaca de la Gran Recesión.

En estas condiciones revisamos la situación actual y perspectivas de este importante componente de la tecnología energética sostenible que es imperativo desarrollar en los próximos años. Nos centramos en el sector transporte porque es el principal escenario en el que los biocombustibles están llamados a actuar, pero no descuidamos sus otros espacios de desenvolvimiento. A la vez, prestamos especial atención al análisis del impacto en el uso del suelo y el agua.

Un objetivo de esta monografía es contribuir a superar el debate en términos de metas políticas y centrar la discusión en los mecanismos de apoyo a los biocombustibles, así como en la evaluación de los costes y beneficios de dichos mecanismos. Si bien es cierto que la transición hacia las energías renovables es inevitable a largo plazo, no es esperable que su crecimiento se produzca en ausencia de intervención gubernamental. **Dicha intervención debería trasladar el menor grado de incertidumbre posible a los agentes intervinientes en el mercado y, en particular, a los consumidores.**

En efecto, el peso de los argumentos de futuro para valorar las respuestas a todas las cuestiones anteriores es especialmente relevante y el grado de incertidumbre que los rodea es enorme. En este sentido, para la prospectiva, hemos tratado de mantenernos lo más cerca posible del consenso entre los expertos. Así, el escenario de referencia que utilizamos para todo el análisis es el *Blue Map* contenido en el *Energy Technology Perspectives* 2010 de la Agencia Internacional de la Energía (*International Energy Agency,* IEA). Por tanto, siempre que no se indique lo contrario, los argumentos a más largo plazo que utilizaremos se corresponden con las sendas alternativas simuladas en relación con los objetivos *Blue Map* para 2050. En diversos apartados ofrecemos nuestra propia contribución al análisis mediante la aplicación de herramientas cuantitativas a cuestiones novedosas como el riesgo de costes en el *mix* de combustibles, la relación entre la evolución de los precios de las materias primas y la expansión de los biocombustibles, o el vínculo entre el desarrollo agrícola en el Sur y la independencia energética del Norte.

Una complicación adicional en el caso de los biocombustibles es que el equilibrio entre mercado y regulación exige, además de la preocupación ambiental, una gestión inteligente de los conflictos de intereses entre los agentes implicados. La conjunción de intereses entre petroleras, compañías eléctricas y automovilísticas, inversores privados ávidos de captar proyectos en temas de moda bajo el paraguas de la intervención gubernamental, e intereses políticos de toda índole, dificulta extraordinariamente la adopción de soluciones basadas en el mercado.

Nuestro objetivo es ofrecer y promover análisis que permitan justificar **acciones específicas de política que supongan costes moderados.** La gran dependencia del sector transporte de los combustibles líquidos y su enorme contribución al incremento del contenido de dióxido de carbono en la atmósfera causante del calentamiento global parecen justificar dichas acciones.

Por supuesto, la monografía pone cierto énfasis en las propuestas para España. El gran tamaño de nuestro sector transporte, sus altos niveles de contaminación y su enorme dependencia energética del exterior hacen que España tenga que tomar medidas de corto plazo para mejorar estos aspectos lo antes posible. Medidas que además sienten las bases para una solución a largo plazo.

En primer lugar, **mantener los compromisos ya contraídos respecto a mezclas en torno al 5%, y promover una participación de los biocombustibles del 10% en 2020** es prioritario, así como llevar a cabo un esfuerzo de coordinación entre los agentes implicados sobre las medidas a tomar, junto con un apoyo decidido a la industria y a la investigación en el área, por supuesto no a cualquier coste.

En segundo lugar, **favorecer el desarrollo de los vehículos híbridos** (electricidad y combustible), por un lado, **y del vehículo *flex*** (combustible fósil y biocombustible), por otro, como las dos alternativas sobre las que cabe esperar resultados cuantitativamente importantes a medio plazo. Estas dos alternativas, que son tecnológicamente viables hoy, presentan una implementación insignificante, a pesar de ser las que realmente ayudarían a reducir las emisiones y la dependencia energética del transporte.

Entre los biocombustibles de primera generación, el bioetanol se erige hoy en día como la mejor alternativa, en particular por ofrecer ventajas en términos de sostenibilidad y algunas oportunidades para la gestión agrícola en España. En el largo plazo, y ante un previsible escenario de precios altos del petróleo, la estrategia es reducir la dependencia de los combustibles fósiles en la línea de las recomendaciones del escenario *Blue Map* de la IEA. Para alcanzar este objetivo, la apuesta mayoritaria por una opción solo eléctrica o solo biocombustibles puede implicar un riesgo de costes para el transporte elevado. Este riesgo retrasaría la transición a un modelo con baja participación de combustibles fósiles. **La mejor manera de reducir este riesgo a largo plazo es la complementariedad de la electricidad y de los biocombustibles de segunda generación** como fuentes energéticas para el transporte.

La monografía se organiza como sigue. La Sección 1 introduce los principales aspectos del entorno tecnológico, económico e institucional en el que se desenvuelven los biocombustibles, así como sus principales perspectivas de futuro. La Sección 2 analiza en detalle la experiencia del etanol en Brasil. A continuación, la Sección 3 analiza los impactos medioambientales de los biocombustibles. La Sección 4 revisa las condiciones de mercado a las que se enfrentan los biocombustibles por el lado de los costes de producción y su evolución en relación con el desarrollo de las distintas tecnologías y frente a sus competidores. La Sección 5 relaciona dichas circunstancias del mercado con la intervención gubernamental, y de manera simultánea con los incentivos para la actividad de investigación, desarrollo e innovación. Fuerzas del mercado, regulación necesaria y actividad innovadora son los tres ingredientes básicos para el desarrollo de una tecnología energética sostenible en los últimos años. Es en esta línea que la última sección de la monografía concluye y desarrolla nuestras recomendaciones.

En definitiva, los biocombustibles líquidos son imprescindibles porque el sector transporte es grande y su contribución al calentamiento global enorme. Son un objetivo en sí mismos y también son complementarios a otras alternativas, pero el mercado no puede por sí solo garantizar su crecimiento, excepto si el petróleo es caro.

Su desarrollo podría suponer un coste similar al que suponen la mayor parte de los esfuerzos de I+D, aunque **una solución renovable para el transporte exige, además, internalizar el coste de las emisiones vía impuestos al carbono y comercio de derechos.** Lo que es crucial es evaluar el coste de implementar buenas políticas. Al menos, tenemos la certeza de que el objetivo es realista, como demuestran otras experiencias internacionales, y a la vez prometedor, por las ventajas adicionales que proporciona, y que vamos a poner de manifiesto en este informe. Las claves para una solución energética sostenible para el transporte a través de los biocombustibles se presentan al final del documento, junto con nuestras principales recomendaciones de carácter global cuando procede, pero sobre todo centradas en España.

1

La bioenergía como apuesta tecnológica de futuro

La bioenergía ha sido el gran recurso energético de la humanidad en su evolución a lo largo de los siglos hasta la llegada de la Revolución Industrial, y sigue siendo un recurso energético esencial en los países menos desarrollados. La bioenergía se vuelve a plantear hoy como apuesta tecnológica de futuro a escala global, principalmente para disminuir nuestra gran dependencia de los combustibles fósiles y reducir las emisiones de CO_2. Además, la bioenergía puede contribuir al logro de una mayor estabilidad en nuestro *mix* energético, al aprovechamiento de las tierras en barbecho y a la reducción de la demanda de agua. Una pieza clave para la bioenergía son los biocombustibles líquidos que inevitablemente han de constituir en el futuro un complemento clave a otras tecnologías energéticas sostenibles.

La bioenergía se puede definir como toda forma de energía procedente de la biomasa, siendo ésta toda la masa viviente, tanto animal como vegetal, que existe sobre la tierra, incluyendo sus residuos. La mayor parte de esta bioenergía corresponde a biomasa primaria sólida (más del 90%). Sin embargo, los biocombustibles pueden ser tanto sólidos como gaseosos o líquidos. En este trabajo nos centraremos en los últimos, también denominados biocarburantes, los cuales son obtenidos a partir de la biomasa mediante procesos químicos y biológicos. Los biocombustibles líquidos son, principalmente, el bioetanol y el biodiésel, y son utilizados de forma creciente en el transporte rodado y en la industria química.

Siguiendo las recomendaciones de la IEA *(International Energy Agency),* vamos a utilizar la siguiente clasificación entre los distintos tipos de biocombustibles líquidos:

- Biocombustibles de **primera generación**: son aquéllos que en la actualidad ya han alcanzado la etapa de producción comercial. En general, proceden de cultivos que utilizan técnicas similares a las de las cosechas agrícolas alimenticias.

- Biocombustibles de **segunda generación** o lignocelulósicos: no compiten por la utilización de suelos agrícolas, sino que son producidos a partir de biomasa lignocelulósica como la contenida en la paja, hierba, tallos, cañas, raíces, madera, cáscaras, etc. Los biocombustibles de segunda generación se encuentran en fase precomercial.

- Biocombustibles de **tercera generación**: son, principalmente, los aceites procedentes de algas y otros microorganismos, así como el hidrógeno procedente de la biomasa. Aún se encuentran en una fase incipiente de desarrollo, muy lejos de su producción a gran escala y, por tanto, de su comercialización, por lo que se espera que no se alcance una gran producción en el corto plazo.

Por último, aunque se empieza a hablar de una cuarta generación de biocombustibles basada en procesos termoquímicos y bioquímicos (GTM *Research*, 2010), lo cierto es que esta terminología aún no ha adquirido relevancia, por lo que no la utilizaremos. A continuación introducimos los principales elementos tecnológicos, económicos e institucionales para una mejor comprensión del entorno en el que se desarrollan los biocombustibles líquidos, a los que a menudo nos referiremos sencillamente como biocombustibles.

1.1 El escenario tecnológico y productivo

1.1.1 La materia prima: el rendimiento de las cosechas y la utilización de terrenos agrícolas y forestales

Inicialmente podemos hacer una distinción entre biomasa procedente de cultivos forestales y de cultivos agrícolas. Así, los cultivos forestales de madera se realizan en bosques modificados con una mayor densidad de árboles. En la recogida de masa forestal a corto plazo, se realiza un corte y recogida de la madera en períodos de pocos años, siendo el rendimiento anual en lugares favorables como el Norte de Europa de hasta 10 toneladas por hectárea, (IEA Bioenergy, 2009). La madera obtenida se utiliza generalmente para la producción de calor o de electricidad.

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. Por otra parte, el rendimiento por hectárea de los cultivos energéticos varía en función del tipo de cultivo (Tabla 1), y ha ido creciendo notablemente desde el año 1960 hasta 2005. Así, en dicho período se ha producido un incremento de rendimiento del 70% para la caña de azúcar y el 400% para el maíz (FAOSTAT, 2007).

Los dos aspectos esenciales en el desarrollo de esta tecnología son la disponibilidad de suelo y la productividad de dicho suelo. En la actualidad se estima que menos de un 1% del suelo dedicado a la agricultura se destina a cultivos energéticos (IEA Bioenergy, 2009). El rendimiento de los cultivos energéticos depende de muchos factores, como son el clima y tipo de suelos. Un rendimiento que se considera rentable es el de unas 10-12 toneladas de biomasa seca por hectárea y año, lo que equivale a unos 220 GJ/Ha. Teniendo en cuenta que la cantidad de energía solar recibida en un año puede ser de 1.000 kWh por metro cuadrado, la conversión de energía solar en bioenergía alcanzaría tan solo un 0,6%.

Los cultivos energéticos han de ser sometidos a las operaciones de cosechado, secado, troceado y transporte para así obtener un producto homogéneo, de tamaño apropiado, lo más denso posible desde un punto de vista energético y con un contenido de humedad pequeño. Las técnicas y tecnologías utilizadas varían mucho entre países, aumentando la productividad con el nivel de desarrollo del país considerado, por lo que se estima que aún hay mucho margen de mejora de la productividad en muchos países.

Tabla 1. Rendimiento máximo de las cosechas de biomasa seca y energía obtenida

Materia prima	Rendimiento (Tm/Ha)	Energía (GJ/Ha)
Madera forestal	7	130
Madera tropical	11	200
Sorgo (3 cosechas/año)	50	850
Hierba Sudán (6 cosechas/año)	40	600
Maíz	25	77
Trigo	22	
Caña de azúcar	30	150

Fuente: Elaboración propia a partir de "Bioenergy: A Sustainable and Reliable Energy Source" [Main Report]. IEA (2009).

En el caso de los residuos forestales, la cosecha surge de las labores de limpieza y mantenimiento de los bosques. Sin embargo, actualmente entre los cultivos energéticos, los residuos más importantes en las regiones de climas templados provienen de la paja del trigo y del maíz, que pueden ser prensados hasta alcanzar unos 15 GJ/Tm (Gil-García, 2008). Para incrementar aún más la densificación energética de la biomasa es muy común formar pellets mediante aplicación de presión en los residuos de la biomasa, los cuales alcanzan densidades energéticas de ~ 17 GJ/Tm. Una opción adicional es someter a la biomasa a procesos de torrefacción, a temperaturas de 200 – 300º C, mediante los cuales la biomasa se convierte en un producto seco, hidrófobo y con mayor densidad energética (19 – 23 GJ/Tm, *cf.* IEA Bioenergy, 2009).

1.1.2 La producción de biocombustibles líquidos

Centrándonos en la producción de biocombustibles líquidos a partir de la biomasa (la generación de electricidad y calor renovable se trata en un Apéndice Técnico a este documento – Guerrero *et al.,* 2010), la tecnología es diversa en función de la materia prima empleada y del tipo de biocombustible que se quiere obtener. No obstante, resulta adecuado hacer una distinción entre biocombustibles de primera, segunda y tercera generación.

El **etanol como biocombustible de primera generación** (1G) es el más utilizado actualmente a nivel mundial, pudiendo producirse de modo natural mediante la fermentación de azúcares por ciertos micro-organismos bajo condiciones acídicas (pH entre 4 y 5). Generalmente, el bioetanol se obtiene a partir de las melazas procedentes de la caña de azúcar, siendo la reacción química más importante la de la conversión de la sacarosa en etanol ($C12H22O11 \longrightarrow 4C2H5OH + 4CO_2$), con un rendimiento aproximado del 80% (Twidell y Weir, 2006). La densidad energética del producto destilado no es muy alta, alrededor de 30 GJ/Tm (la del petróleo es de 42 GJ/Tm; Larkin *et al.,* 2004). El residuo que queda de la fermentación se puede lavar y secar hasta poder valorizarse económicamente, utilizándose como abono o como pienso. El bioetanol se puede utilizar directamente en algunos motores de combustión preparados específicamente para ello o mezclarse con combustibles fósiles (“gasohol”), de forma que puede utilizarse en motores de combustión. Un gasohol denominado, por ejemplo, E10, significa que la proporción de etanol es del 10%, estando generalmente el porcentaje comprendido en el rango 10-15%. La IEA, (IEA ETP, 2008), ha estimado los rendimientos medios aproximados para la producción de bioetanol de primera generación (Tabla 2) para varias regiones geográficas. Como se aprecia, por lo general, el mayor rendimiento se obtiene para el obtenido de la caña de azúcar.

Tabla 2. **Rendimientos en la producción de bioetanol de primera generación a partir de varios tipos de biomasa (panel izquierdo). Rendimientos en la producción de biodiésel a partir de varios tipos de biomasa (panel derecho)**

Materia prima	Región	lge/ha
Caña de azúcar	Brasil	4.490
Caña de azúcar	Media mundial	3.630
Remolacha	Europa	3.300
Maíz	Norte América	1.980
Trigo	Europa	1.650

Materia prima	Región	lge/ha
Colza (FAME)	Europa	1.080
Soja/colza (FAME)	USA	720
Colza (FAME)	Brasil	630
Ligno-celulosa	Mundial	3.000
Lípidos de microalgas	Mundial	11.863(lge)

Fuente: Elaboración propia a partir de IEA.

El **biodiésel como biocombustible de primera generación** es el segundo tipo de biocombustible más utilizado a nivel mundial, obteniéndose a partir de aceites vegetales procedentes de semillas oleaginosas de una gran variedad de plantas: soja, colza, girasol, palma, etc. El contenido energético es de alrededor de 36-40 GJ/Tm, un 90% de la que provee gasóleo o diésel (IEA ETP, 2008). Algunos de estos aceites pueden quemarse directamente en motores diésel, pero su uso continuado hace que, debido a su combustión algo incompleta y a su alta viscosidad, puedan provocar obstrucciones en los inyectores. Para rebajar la viscosidad se somete a los aceites a un proceso de hidrólisis y de transesterificación.

En la Tabla 2 se presentan también para el biodiésel los datos del rendimiento en litros equivalentes de diésel por hectárea, correspondientes a varias regiones geográficas. Para su comparación posterior también se presenta en la tabla el dato correspondiente al biodiésel de segunda generación a partir de lignocelulosa (IEA ETP, 2008), así como de lípidos procedentes de algas marinas (Atsumi *et al.,* 2009).

El **bioetanol como biocombustible de segunda generación** (2G) o lignocelulósico es un tipo de biocombustible que se encuentra en fase precomercial, en el que los azúcares necesarios para su producción se obtienen a partir de biomasa celulósica en lugar de utilizar productos agrícolas también destinados a la alimentación, tal como ocurría con el bioetanol de primera generación. De este modo, la producción de la biomasa es más sostenible, abundante y barata y no compite directamente con las cosechas alimenticias. Ejemplos de biomasa celulósica aptos para bioetanol de segunda generación serían tallos de muchas plantas, hierbas, maderas, raíces, paja, etc.

La biomasa celulósica está compuesta principalmente por celulosa y hemicelulosa, formadas por moléculas de diversos azúcares fuertemente enlazados, y por lignina,

que es un compuesto de fenilpropeno que actúa como material adhesivo entre las cadenas de azúcares. La conversión de la biomasa de lignocelulosa en bioetanol requiere pre-tratamientos para separar la biomasa anterior en celulosa, hemicelulosa y lignina, así como la hidrólisis de la celulosa y de la hemicelulosa para la producción de azúcares (Wyman, 2008). Esta etapa puede ser química (por ejemplo, mediante hidrólisis ácida) o biológica (utilizando la enzima llamada celulasa). A continuación es necesaria la fermentación de los azúcares para producir alcohol y la posterior separación del etanol de los co-productos de la fermentación.

El **biodiésel como biocombustible de segunda generación**, también conocido como biodiésel sintético o biodiésel avanzado, es un biocombustible líquido que se produce a partir de la biomasa lignocelulósica por medio de varios procesos termoquímicos y que aún se encuentran en fase de desarrollo. De estos procesos, el más empleado es el conocido por las siglas BtL ("*Biomass to Liquids*"). Así, en el primer estadio del proceso se gasifica la biomasa. Seguidamente se procede a una purificación del gas obtenido para lo cual se eliminan los alquitranes, partículas y pequeñas proporciones de gases contaminantes obteniéndose un syngas con relaciones apropiadas de hidrógeno y monóxido de carbono. El principal proceso catalítico para la conversión del syngas obtenido en un biocombustible líquido es el de Fischer-Tropsch. En este proceso llevado a cabo a altas presiones y temperaturas, la mezcla de hidrógeno y monóxido de carbono puede ser transformada en varios tipos de hidrocarburos líquidos y gaseosos.

El biocombustible procedente de las algas se considera de **tercera generación** (3G), aún en fase de investigación y desarrollo. Dentro de las algas, el esfuerzo principal se centra en las microalgas, dada su alta concentración de lípidos. Una gran ventaja en el cultivo de algas es que no compiten directamente por terrenos puramente agrícolas. Tampoco compiten por grandes suministros de agua dulce, ya que muchos tipos de algas se pueden cultivar en aguas marinas, aguas de alta salinidad, e incluso en aguas residuales (IEA ETP, 2008). Un aspecto muy interesante de las microalgas es que presentan unas tasas de crecimiento mucho mayores (pocos días) que las correspondientes a las cosechas agrícolas. Incluso se ha comprobado que la aportación directa de CO_2 aumenta notablemente el rendimiento, lo que ha llevado a proponer que el cultivo de este tipo de algas puede ayudar sustancialmente al secuestro del CO_2. Todo esto hace que el rendimiento potencial, por hectárea, pueda ser de hasta 10-20 veces superior al de cosechas convencionales (Williams y Laurens, 2010). También se está ensayando la producción de etanol a través de la fotosíntesis en algas a las que se les introducen enzimas que sintetizan este biocombustible de forma directa.

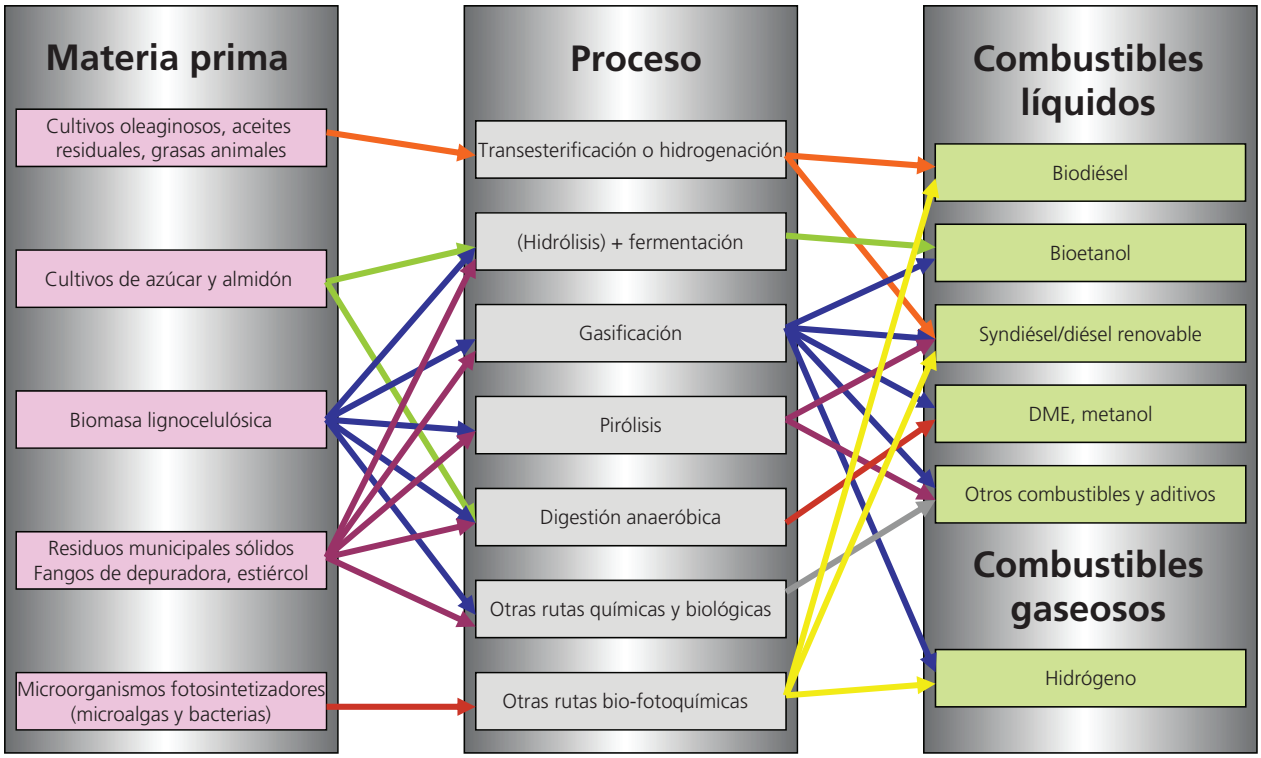
El **hidrógeno como biocombustible de tercera generación** representa una alternativa a largo plazo a los combustibles fósiles, aunque actualmente su aplicación para el transporte se puede considerar casi nula. El atractivo del hidrógeno se debe a que la energía almacenada puede convertirse en electricidad con una gran eficiencia mediante la utilización de pilas de combustible. Este proceso además se realiza sin emitir a la atmósfera gases de efecto invernadero. Por el contrario, la combustión de hidrógeno en un motor de explosión, aparte de ser menos eficiente (se estima que la eficiencia de conversión de energía química a mecánica en una situación de tráfico con un vehículo no supera el 10%), puede generar contaminación por óxidos de nitrógeno si el proceso de combustión se realiza con aire. Alrededor del 48% del hidrógeno en la actualidad se obtiene de los combustibles fósiles (gas natural y carbón), siendo muy marginal (menor de un 5%) su obtención a partir de fuentes de energía renovable. Una situación que si ha de invertirse en un futuro cercano, será en buena medida por la obtención de hidrógeno a partir de biocombustibles de segunda generación (Guerrero y Martínez-Duart, 2010).

A partir de lo anterior, el Gráfico 1 muestra un esquema general y resumido de los distintos procesos de conversión de diferentes tipos de biomasa en biocombustibles líquidos e hidrógeno. Como se puede comprobar, la biomasa lignocelulósica y los residuos son las materias primas que potencialmente pueden ser utilizadas en un mayor número de procesos para obtener biocombustibles. Sin embargo, conviene señalar que las distintas rutas de producción han de ser ponderadas en función de sus costes, algo que se analizará con más detalle en la Sección 4.1.

Por otro lado, en función del grado de penetración en el mercado, las distintas tecnologías se pueden encuadrar en distintas etapas de desarrollo (Gráfico 2). Así, se puede considerar que los biocombustibles de primera generación se encuentran ya, en gran medida, en fase de *competición*. Esto quiere decir que se producen sin ayudas, aunque a menudo existen algunas medidas de promoción a la producción más o menos visibles en muchos países. De hecho, también se considera que una parte de la tecnología se encuentra en fase de entrada en el *mercado*, es decir, aún con ayudas para el mantenimiento de su actividad. Además, debido principalmente a la situación de los costes y volumen de producción, se considera al bioetanol 1G en una situación más avanzada que en el caso del biodiésel 1G.

En relación con los biocombustibles de segunda generación la situación es la contraria, considerando que el biodiésel 2G se encuentra en una posición más avanzada en su *introducción* en el mercado (es decir, de entrada en funcionamiento de los primeros prototipos a efectos de demostración), aunque aún muy lejos de ser competitivo.

Gráfico 1. Esquema de las distintas rutas para la producción de biocombustibles líquidos e hidrógeno gaseosos a partir de biomasa

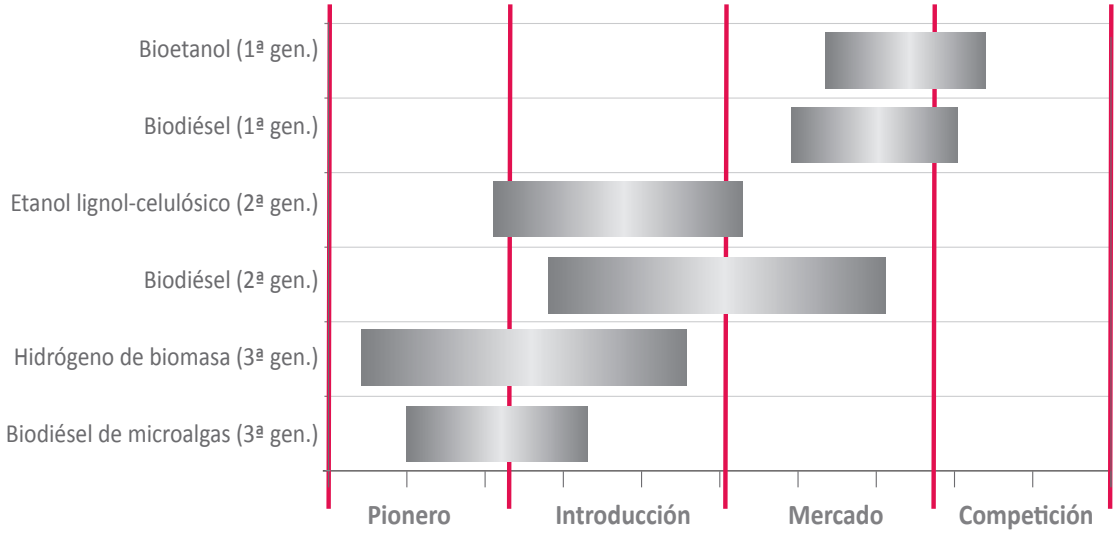


Fuente: Elaboración propia.

Se está empezando a comercializar tanto bioetanol como biodiésel producido a partir de biomasa lignocelulósica, pero aún es necesario un mayor esfuerzo en investigación básica para dominar el proceso de fabricación de biocombustibles.

Por último, la tecnología se encuentra menos desarrollada en la producción de biodiésel a partir de microalgas y en la obtención de hidrógeno a partir de la biomasa. En este segundo caso se considera que es necesaria más investigación que en el primero, pero la mayor actividad científica y tecnológica nos indica que puede encontrarse más cerca de ser introducido el proceso con hidrógeno en el mercado. En ambos casos la tecnología se encuentra alejada aún de la puesta en funcionamiento de prototipos, es decir, se halla en fase *pionera*.

Gráfico 2. Estado del desarrollo de cada una de las tecnologías dentro de las empleadas para la producción de biocombustibles



Fuente: Elaboración propia a partir de IEA.

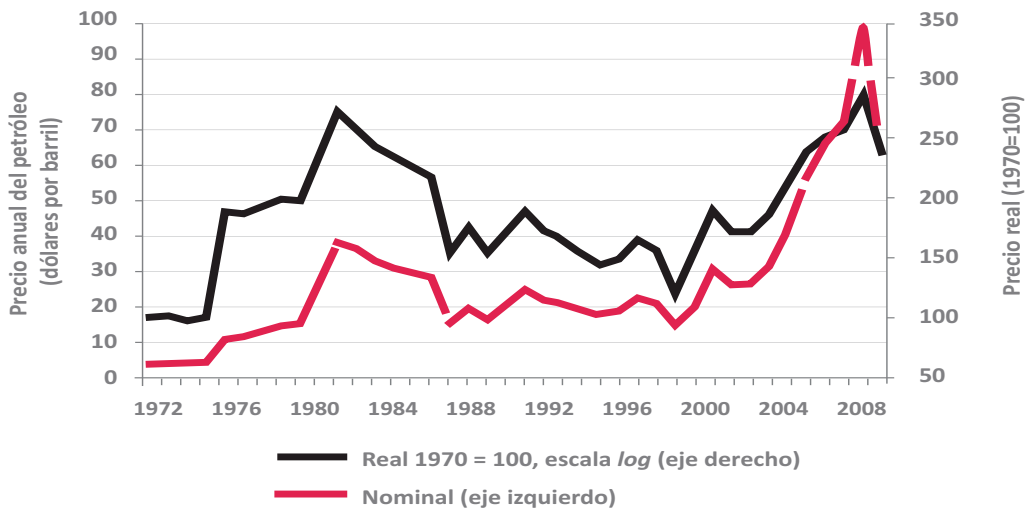
1.2 El entorno económico

1.2.1 Los mercados y el escenario macroeconómico

El entorno económico en el que se desenvuelven los biocombustibles viene marcado por los potenciales beneficios energéticos y ambientales que aportan. Desde el punto de vista energético es claro que la evolución de los precios del petróleo y de los alimentos determinan en buena medida los períodos de auge de la industria de biocombustibles. Dichos períodos de auge se han producido tras los *shocks* del petróleo de los años setenta, y en la última década, y han venido fundamentalmente motivados por la evolución (en términos reales) del precio del crudo que muestra el Gráfico 3.

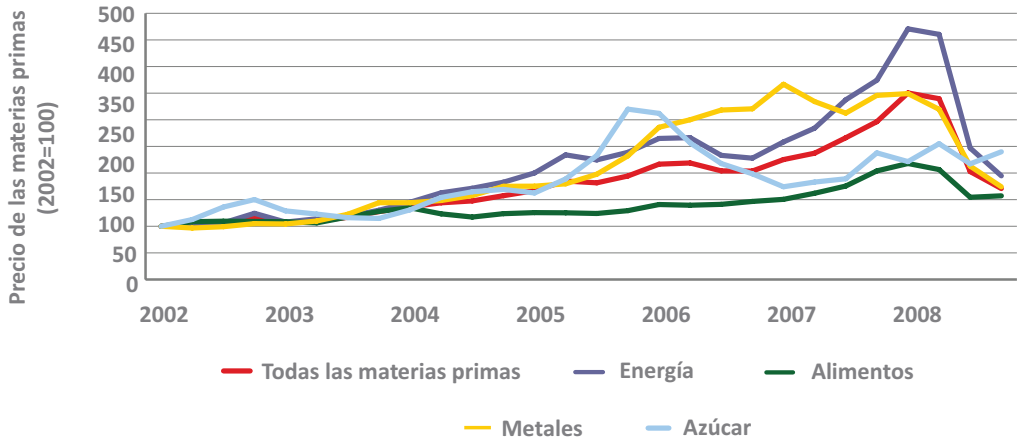
A su vez, en los años anteriores a la reciente crisis financiera internacional, las tensiones en el precio del petróleo se trasladaron a los precios internacionales de las materias primas (Gráfico 4) y más concretamente a los precios de los *inputs* de la industria de biocombustibles con consecuencias económicas de indudable transcendencia que revisaremos en esta monografía.

Gráfico 3. Evolución del precio del barril de petróleo en dólares nominales y reales (ajustado por la inflación medida por el Deflactor del PIB en EE UU)



Fuente: Elaboración propia a partir de datos del FMI (Fondo Monetario Internacional).

Gráfico 4. Evolución reciente del precio de las principales materias primas



Fuente: Elaboración propia a partir de estadísticas IMF.

En el caso de los biocombustibles, como en tantos otros mercados con influencia para entornos con externalidades en su caso asociadas a los gases de efecto invernadero (GEI), más allá de las señales de precios, la regulación tiene un papel decisivo para el aprovechamiento de los escenarios de mercado favorables. Por supuesto, la regulación ha de venir fundamentalmente determinada por la preocupación ambiental.

Una complicación adicional en el caso de los biocombustibles es que el equilibrio entre mercado y regulación exige, además de la preocupación ambiental, una gestión inteligente de los conflictos de intereses entre los agentes implicados. Existe por un lado la tensión obvia dentro del sector energético entre la industria de biocombustibles y la petrolera en lo que se refiere al suministro de combustibles líquidos al sector transporte. Existe también la influencia decisiva de los planes estratégicos de la industria automovilística, y quizás de las industrias de aviones o barcos, en cuanto al futuro del sector transporte. Además, el sector eléctrico podría preferir jugar un papel en el futuro del transporte, en vez de situarse como un mero observador de la pugna entre combustibles líquidos de distinta naturaleza aderezada con comportamientos estratégicos de los fabricantes de automóviles.

Ninguno de los agentes implicados es particularmente pequeño, y la ausencia de un entorno económico competitivo complica extraordinariamente la adopción de soluciones estrictamente basadas en el mercado. Además, los países ricos tienden a ver los biocombustibles como una mercancía agrícola, por lo que a menudo entra en juego el proteccionismo del Norte frente al Sur más competitivo en el uso agrícola y forestal. Sanz (2009) examina en cierto detalle estos aspectos, así como el vínculo entre las mejoras en la productividad del sector agrícola en los países emergentes y sus oportunidades de desarrollo económico. A diferencia de su análisis, nuestro énfasis es en los usos de la tierra y el agua y las oportunidades que los biocombustibles brindan a este respecto.

Por último, el proceso está jalonado por barreras al comercio internacional de todo tipo y otras complicaciones de los procesos políticos. En definitiva, diversos mercados oligopólicos, ciertas oligarquías, y la más alta política parecen invitados a una discusión que debería tratar principalmente de tecnología energética sostenible.

Los retos del entorno económico para los biocombustibles son, por tanto, titánicos. A menudo será difícil mantener firme el timón cuando estamos sometidos a intereses económicos tan fuertes y de tan diversa naturaleza. Aun en estas condiciones es posible promover análisis que permitan justificar acciones específicas de política que supongan costes moderados. Quizás la evidencia acerca de la respuesta de la economía del sector transporte y sus emisiones de CO_2 a ciertas acciones de política

podría permitirnos contrastar adecuadamente los modelos económicos que tengan por objetivo valorar los beneficios energéticos y ambientales que los biocombustibles pueden generar.

Además, conviene no olvidar que la alternativa energética que representan los biocombustibles no solo significa una oportunidad para los países del Norte de reducir su dependencia de los productores de petróleo, sino también una oportunidad para los países del Sur de rentabilizar sus cosechas, tanto más cuanto más eficientemente estén repartidos los derechos de propiedad sobre las mismas. Dicha rentabilidad podría significar no solo mejoras para el Sur en salud, educación e infraestructuras, sino además canales adicionales de cooperación Norte-Sur. Además, el "aparente" conflicto entre biocombustibles y alimentos (véase Sección 3 de este documento)[1] se reduce a los biocombustibles de primera generación. Incentivar el desarrollo de los de segunda generación (y de los de tercera a más largo plazo) eliminaría esta posible controversia, al mismo tiempo que daría la posibilidad a los países del Sur de tener acceso de un producto de mucho mayor valor añadido.

1.2.2 El sector transporte: la necesidad de biocombustibles líquidos

El transporte absorbe cerca del 20% del uso global de energía y es responsable de un 23% de las emisiones de CO_2 de origen energético (IEA, 2009). En el caso de EE UU, el porcentaje de emisiones provenientes de dicho sector está por encima del 30%, y en España casi alcanzó el 40% en 2007.

El petróleo domina hoy casi absolutamente el suministro de energía al sector transporte. Esto es así hasta el punto de que la IEA define el escenario de referencia para sus análisis como uno en el que el petróleo sigue abasteciendo alrededor del 90% del combustible del sector transporte en 2050 (IEA, 2009). Dicho escenario de referencia refleja sencillamente las tendencias actuales en ausencia de nuevas políticas. En ese marco, las proyecciones apuntan a un aumento del 50% en el uso de energía y las emisiones del trasporte en 2030, y de más del 80% en 2050. Un futuro insostenible.

Cualquier objetivo de reducción de las emisiones globales (estabilizar la concentración de GEI a 450 ppm de CO_2 equivalente) exige una actuación contundente sobre las emisiones del sector transporte. Todos los modos de transporte en todos los

1 La Sección A.3 del Anexo (disponible en www.fundacionideas.es) realiza un análisis más completo sobre este punto.

países necesitarán reducir sus emisiones significativamente. Para ello será necesaria tanto la adopción de nuevas tecnologías para los vehículos y los combustibles, como un cambio en los patrones de transporte de mercancías y pasajeros hacia modos más eficientes.

A corto plazo la implementación de objetivos de eficiencia parece decisiva. El escenario de partida, sin embargo, se presenta complicado. En la última década el volumen de comercio mundial ha venido creciendo a tasas superiores a las del crecimiento del PIB real. Esta expansión del comercio ha tenido consecuencias evidentes sobre el transporte de mercancías y pasajeros que alcanzó su máxima intensidad el primer trimestre de 2009. La Tabla 3 muestra un poco de evidencia relevante para algunos países. Como muestra la comparativa, España presenta los mayores ritmos de crecimiento de las emisiones en el sector transporte, en los pasajeros por kilómetro, en el transporte de mercancías, etc. De hecho, esto es así si comparamos España con la gran mayoría de los países de la OCDE, por lo que podemos tomar su experiencia para narrar la amenaza.

La economía española experimentó entre 1995 y 2007 uno de sus ciclos expansivos más importantes. Uno de sus efectos ha sido el enorme aumento de la demanda de transporte, tanto de uso privado como de mercancías, terrestre, aéreo o marítimo. Entre los distintos subsectores, el más destacado sigue siendo, con diferencia, el transporte por carretera. Este sector es en la actualidad uno de los más importantes en Europa y sus ritmos de crecimiento están entre los más elevados, duplicando e incluso triplicando el de países como EE UU, Alemania o Italia como muestra la tabla. Por ejemplo, entre 1995 y 2007 el número de pasajeros por kilómetro creció en España un 60% (un 4% anual), y las mercancías transportadas aumentaron un 136% (más de un 7% anual). En ambos casos, los crecimientos fueron claramente superiores al PIB real y a la población nacional, que fueron del 3,7% y 1,1% anual, respectivamente. Asimismo, las emisiones de CO_2 provenientes del sector transporte aumentaron en España en este periodo un 74% (un 4,7% anual), notablemente superior al ya importante crecimiento que han sufrido las emisiones totales, del 53% (un 3,6% anual). Podemos asegurar que el sector transporte es uno de los causantes del alejamiento de la economía española de los objetivos marcados por el Protocolo de Kioto. No es el único caso.

Parece incuestionable, por tanto, el tamaño del daño ocasionado por la quema de combustibles fósiles en el sector transporte. ¿Hay alternativa? A medio plazo será clave la definición de la nueva tecnología. La cuestión es precisar la evolución en el tiempo de la combinación de biocombustibles avanzados y de bajas emisiones, electricidad e hidrógeno, que va a reemplazar la participación del petróleo y otros

Tabla 3. Escenario macroeconómico, tendencias del transporte y sus emisiones

	España			EE UU			Alemania			Italia		
			Crec. Anual			Crec. Anual			Crec. Anual			Crec. Anual
	1995	2007	95-07	1995	2007	95-07	1995	2007	95-07	1995	2007	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**	1.325	1.570	**1,4**
Pasajeros carretera (millones/km)	251.189	402.456	**4,0**	3.899.426	4.486.974	**1,2**	883.800	933.384	**0,5**	701.860	871.303	**1,8**
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**	219.377	217.512	**-0,1**
Emisiones de CO_2 (Mt), total	250	381	**3,6**	5.270	5.915	**1,0**	890	830	**-0,6**	423	458	**0,7**
Emisiones de CO_2 (Mt), transporte	87	152	**4,7**	1.666	1.954	**1,3**	189	180	**-0,4**	120	142	**1,4**
% total	35,0%	39,9%		31,6%	33,0%		21,2%	21,7%		28,3%	30,9%	
Emisiones transporte en carretera	61	101	**4,2**	1.258	1.528	**1,6**	160	141	**-1,0**	102	116	**1,1**
% transporte	70,1%	66,1%		75,5%	78,2%		84,6%	78,3%		85,4%	82,1%	

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

combustibles fósiles en el transporte. Del mismo modo que hay muchas esperanzas depositadas en el desarrollo del vehículo eléctrico, también hay certeza acerca de las limitaciones que dicha opción tecnológica representa para camiones, aviones y barcos en el horizonte de referencia de 2050 en todas partes, e incluso para vehículos ligeros en algunas regiones.

2

Biocombustibles para el sector del transporte: el caso de Brasil[2]

Aunque los biocombustibles líquidos son utilizados de forma creciente en la industria química, conviene destacar el papel que están llamados a jugar en el sector transporte. A nivel mundial, si consideramos solo los vehículos ligeros para pasajeros, éstos han alcanzado los 780 millones de unidades según las últimas estadísticas disponibles (2007), con tasas de crecimiento anuales alrededor de un 3% en el período 1990-2007, dominados por los vehículos de gasolina en la mayor parte de países (IEA ETP, 2010). Se estima que estas tasas de crecimiento pueden incluso aumentar a partir de la aparición de vehículos de bajo coste como el Tata Nano. En la Unión Europea y en España también se han producido crecimientos significativos en el número de vehículos.

Así, si estudiamos el caso de EE UU, en el que las estadísticas permiten encontrar un nivel de desagregación adecuado, comprobamos que el número de vehículos impulsados por combustibles alternativos derivados del petróleo está estancado o en ligero descenso. Mientras, el número de vehículos eléctricos crece lentamente, los basados en hidrógeno representan valores insignificantes, y los que realmente crecen son los que utilizan etanol (E85).

En cuanto a la producción de biocombustibles para el transporte, según los últimos datos oficiales publicados por la Agencia Internacional de la Energía (2007), el porcentaje de biogasolina utilizada en el sector transporte sobre el total de derivados del petróleo utilizado para tal fin alcanzó el 0,90%, mientras que el porcentaje de biodiésel llegó al 0,42%. Como veremos, el margen de incremento de estos porcentajes es enorme.

2 Esta sección analiza el caso de Brasil como una experiencia especialmente destacable. Para ver la situación de los biocombustibles en España, Europa y otras regiones del mundo véase la Sección A.1 del Anexo de este documento (disponible en www.fundacionideas.es).

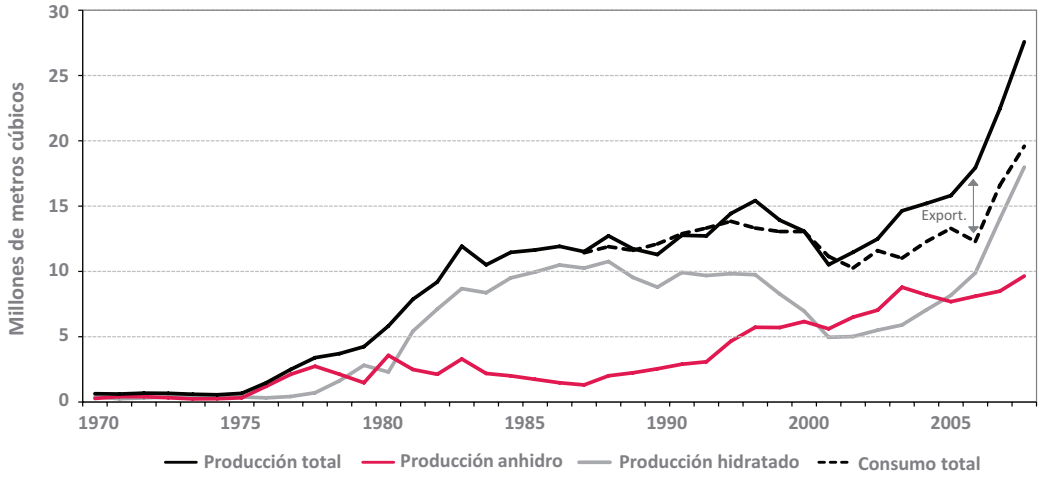
El caso del etanol en Brasil es un claro ejemplo de éxito y viabilidad económica en el uso de biocombustibles para el sector transporte[3]. Además de la importancia que tiene para el transporte, la industria de etanol es hoy en día una pieza fundamental para el desarrollo del país. Constituye una pieza clave para su política energética, para su sector exterior, y para su política de empleo, a la vez que genera importantes externalidades en otros sectores productivos. Actualmente, Brasil es el principal productor y exportador de azúcar y de etanol del mundo, y su generación es responsable de entre 3,5 y 4 millones de puestos de trabajo, y del 3,5%-4% del PIB. De toda la caña de azúcar producida, aproximadamente la mitad va a la producción de etanol y la otra mitad a su refinado. Aunque las condiciones brasileñas no son exactamente reproducibles en otros países, el caso del etanol es referente mundial para aquellas economías que tienen a los biocombustibles en su agenda energética. En esta sección describimos algunos de los aspectos más importantes que están relacionados con el éxito del etanol brasileño. Una experiencia de éxito que la nueva situación de petróleo abundante en el campo de "Libra" no debería modificar.

Desde 1930, la caña de azúcar se usa en Brasil, además de para el consumo de azúcar refinada, para producir etanol para el transporte. Pero el primer gran avance del etanol se dio tras los *shocks* del petróleo de los años setenta. Desde entonces la evolución del etanol en Brasil ha venido ligada a la situación en los mercados del azúcar, del automóvil y, sobre todo, del petróleo. El Gráfico 5 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, como de nuevo ilustra el Gráfico 3 (véase sección 1.2), y también por los cambios de política y en el entorno internacional, como ilustra el Gráfico 6.

Las políticas y los mecanismos diseñados también han favorecido el éxito de los biocombustibles en Brasil. Por un lado, para que los productores de caña de azúcar tengan incentivos para producir grandes cantidades de caña y dedicar parte de la producción a la generación de etanol. Por otro lado, para que los productores de vehículos tengan incentivos para producir vehículos que usen biocombustibles (etanol en este caso) y los consumidores tengan incentivos para consumir etanol en lugar de adquirir gasolina. Dichos incentivos parecen haber acompañado adecuadamente las señales de precios en los mercados relevantes: azúcar, vehículos y petróleo. Para ello,

3 En Almeida *et al.* (2007, 2010), entre otros trabajos, se discute en detalle el caso de los biocombustibles en Brasil.

Gráfico 5. Evolución de la producción de etanol en Brasil



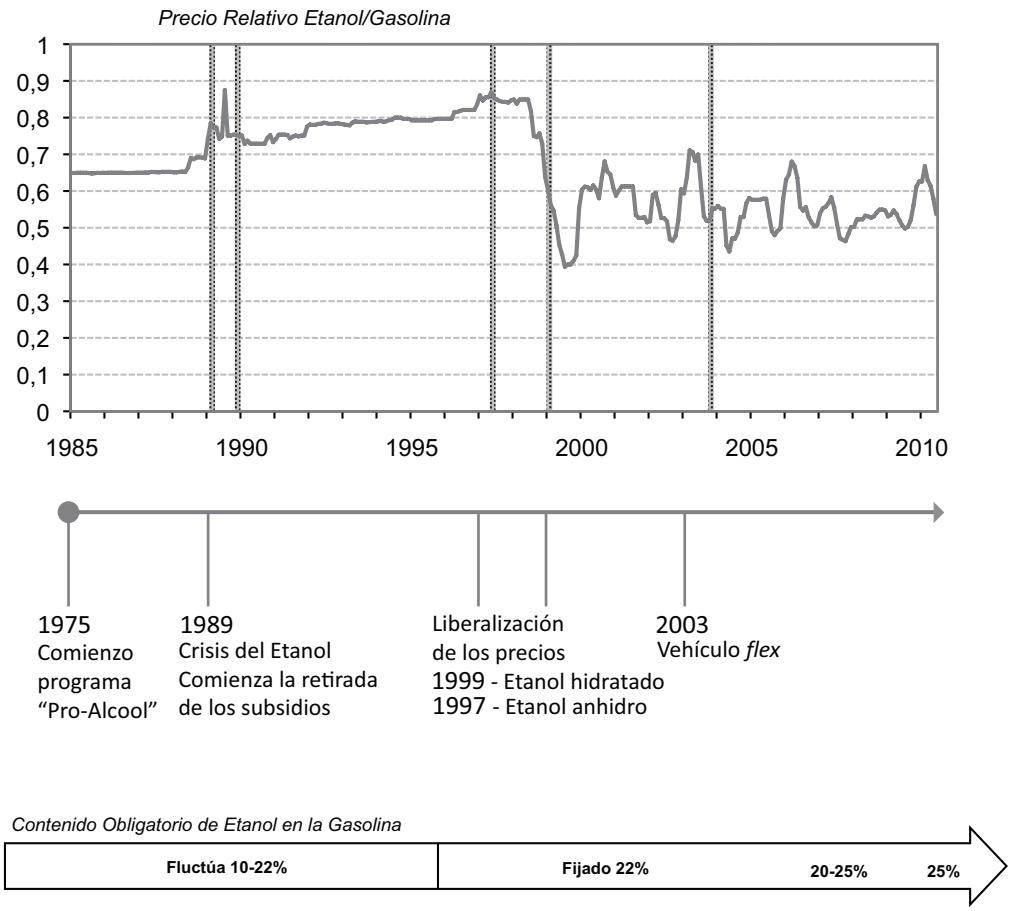
Fuente: Elaboración propia a partir de IEA, y estadísticas Brasil.

ha sido necesario alcanzar unos notables niveles de productividad en la producción de caña de azúcar y de etanol, el desarrollo de vehículos flexibles *(flex)* que permitan el uso de gasolina o etanol indistintamente, y un sistema fiscal que favoreciendo la competitividad del etanol frente a la gasolina a nivel nacional no resulte demasiado distorsionante.

Si bien el éxito de los biocombustibles en Brasil proviene de los aciertos asociados al descubrimiento de las oportunidades que se abrían para el etanol en un entorno de petróleo caro, no es menos cierto que los controles de precios y la generalización de subsidios de la etapa inicial no favorecieron un marco estable cuando la situación en los mercados cambió[4]. Sin embargo, tras dicha primera etapa caracterizada por la gran expansión inicial y el posterior estancamiento, se llega al período más reciente marcado 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 de combustible flexible *(flex).*

4 Hasta 1997 el Gobierno fijaba el precio del etanol a una fracción del precio de la gasolina. Ante precios bajos de la gasolina, esto perjudica seriamente a los productores del etanol. Estos controles de precios se eliminaron paulatinamente tras la liberación de los mercados de combustible en 1997, y desde 2002 sus evoluciones son libres. Desde 2002 hasta la reciente crisis, el precio del etanol ha seguido el precio de la gasolina, pero los aumentos han sido inferiores, lo que le ha hecho ganar en competitividad.

Gráfico 6. El precio relativo del etanol con la gasolina y episodios históricos en Brasil



Fuente: Elaboración propia a partir de IEA, y estadísticas Brasil.

Los *flex* son vehículos que pueden usar cualquier mezcla de gasolina y etanol que el consumidor desee. Así, con esta tecnología se reduce enormemente el riesgo asociado a los cambios bruscos en los precios relativos del etanol/gasolina, se eliminan los problemas de suministro de etanol y, muy importante, se mejora el riesgo asociado a los coches que solo usan gasolina, al poder elegir entre gasolina y etanol (mayor diversificación). Esto también ha permitido que la decisión entre consumir etanol y gasolina se reduzca a una decisión relacionada con los precios relativos entre gasolina y etanol, y no a una decisión de adquisición de un bien duradero (el tipo de vehículo), que es más costosa, más arriesgada y más de medio plazo. Así, a partir de 2001, los precios del etanol se volvieron nuevamente atractivos para los consumidores finales, y en 2006 el 80% de las ventas de automóviles brasileños fueron *flex.* A los ritmos actuales, más del 40% del parque automovilístico de Brasil en 2015 podría ser de este

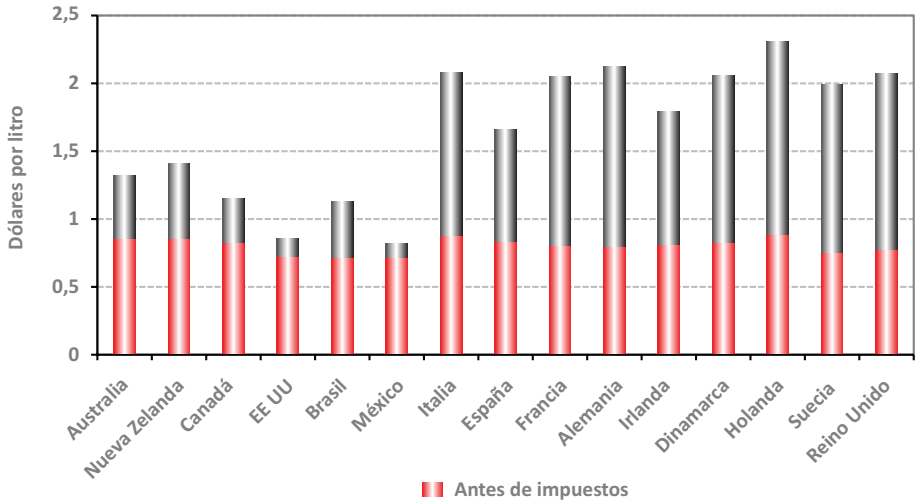
tipo de vehículos. En 2007, la producción de etanol en Brasil se estimó en 22,2 miles de millones de litros (casi el 12% del combustible del transporte), consumiéndose casi el 80% en el país, y aumentando enormemente las exportaciones de etanol brasileño al resto del mundo (EE UU como mercado más importante).

Dada las diferencias en eficiencia energética entre el etanol y la gasolina y la eficiencia del motor *flex,* el precio por litro del etanol hidratado no debe superar el 70% del precio de la gasolina (véase de nuevo el Gráfico 6). Entre 2001 y 2008, este porcentaje tan solo se ha superado en dos ocasiones puntuales (primer trimestre de 2003 y 2006). Así, la sostenibilidad económica del etanol se ve favorecida por unos precios altos del petróleo y de la gasolina. De hecho, otro de los pilares clave para la expansión del etanol en Brasil es que los precios de su gasolina son relativamente más altos que en los países vecinos (Argentina, Chile, Colombia) y en otros emergentes (China, India, etc.) e incluso en comparación con algunos desarrollados como Canadá, Japón y EE UU. Este hecho se debe, principalmente, al alto nivel de impuestos sobre la gasolina, que supone aproximadamente un 40% sobre el precio total (Gráfico 7).

Pero además, el precio del etanol tiene que ser lo suficientemente alto como para compensar los costes. Así, cuanto menores sean los costes de producción, menor será la exigencia requerida al precio del etanol para que su producción sea rentable y el precio relativo sea favorable al biocombustible respecto a la gasolina. De hecho, un aspecto crucial para el éxito del etanol en Brasil es su bajo coste de producción. Al comparar el etanol de caña de azúcar con etanol producido con maíz o trigo, por ejemplo, la ventaja de Brasil es clara (véase, por ejemplo Lichts, 2004). El coste de la caña de azúcar se estima que es entre 0,10 a 0,12$/litro de etanol, mientras que el de producirlo con maíz o trigo se estima que es de 0,20-0,35 $/litro de etanol. Otros costes como el de la mano de obra (muy importante, al ser la producción de caña muy intensiva en este factor) y de la maquinaria también son más bajos en Brasil que en Europa o EE UU. El coste del etanol se estima en torno a los 0,23$/litro, con un rango que puede estar entre 0,21-0,29$/litro.

Para favorecer el precio del etanol respecto al de la gasolina, el Gobierno brasileño viene estableciendo algunos sistemas de incentivos a la producción y al consumo de etanol. Una vez superada la etapa de subsidios directos a la producción, que resultaron inefectivos y con efectos negativos en las arcas públicas en los noventa, las políticas se centran hoy en facilitar el acceso al crédito y en ciertas ventajas fiscales. Por un lado, los productores tienen acceso a líneas de crédito especiales por el Banco Nacional de Desarrollo Económico y Social (a tipos de interés internacionales), que son más baratas que el crédito disponible en los bancos privados (los tipos de inte-

Gráfico 7. El precio de la gasolina, antes y después de impuestos, 2008



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la IEA.

rés nacionales de mercado son más elevados). Por otro lado, el etanol recibe dos tipos de incentivos por parte del Gobierno en forma de ventajas fiscales: el etanol soporta unos impuestos al consumo que son mucho menores a los de la gasolina y, además, las contribuciones a la seguridad social son más altas para los productores de gasolina que para los de etanol. Aunque hay diferencias por Estados (Sao Paulo es el que más favorece el etanol relativamente), los impuestos pueden llegar a tener el doble de peso en el precio final de la gasolina que en el precio final del etanol. También los impuestos federales que pagan los vehículos *flex* son menores a los que pagan los de gasolina.

La expectativa para el futuro es que la demanda internacional de etanol brasileño se eleve debido a la mayor sensibilidad ambiental y al endurecimiento de la regulación contra la contaminación y las emisiones. Ya hay muchos países que establecen objetivos de biocombustibles en su agenda energética para los próximos años. Pero la mayoría de estos países tienen un potencial pequeño o insuficiente de producción. Japón, por ejemplo, está tratando de llegar a un acuerdo para hacer de Brasil su proveedor de etanol principal. India y China, así como EE UU y buena parte de la Unión Europea tendrán dificultades para producir el etanol necesario para cumplir con sus objetivos. Este podría no ser el caso de España. Además, las negociaciones para liberalizar el sector de la agricultura a nivel internacional favorecerán en el medio plazo la producción de etanol, al reducir el precio de la materia prima. Por último, una

condición necesaria para la exportación a gran escala de etanol de Brasil será el proceso de certificación ambiental. Puesto que la preocupación medioambiental es la principal motivación para la producción de etanol, los gobiernos deben estar seguros de que su producción no está asociada a impactos ambientales y sociales, como la deforestación y las malas condiciones de trabajo. En los próximos años será necesario un esfuerzo en investigación muy importante para poder garantizar y certificar las buenas propiedades medioambientales de los biocombustibles.

3

El impacto medioambiental directo e indirecto de los biocombustibles[5]

3.1 Emisión y mitigación de gases de efecto invernadero

Las emisiones GEI producidas por los biocombustibles son difíciles de medir porque hay que tener en cuenta todos los procesos desde el crecimiento de la biomasa hasta su combustión en el transporte. En las emisiones GEI mediante el Análisis del Ciclo de Vida (ACV), los beneficios que puedan reportar los biocombustibles se estiman en términos de la reducción de emisiones en relación con las emitidas por los combustibles fósiles convencionales desde que se extraen hasta que se utilizan en automoción. Entre los biocombustibles de primera generación se observa que el bioetanol producido a partir de la caña de azúcar tiene unas emisiones muy reducidas. También señalaremos que el bioetanol que se produce del trigo puede presentar en algunos casos excelentes resultados (IEA Bioenergy, 2009). Por el contrario, el bioetanol obtenido a partir del maíz en EE UU aporta muy poco a la reducción de GEI.

Los biocombustibles lignocelulósicos o de segunda generación tienen emisiones GEI relativamente bajas, lo cual es consecuencia de la utilización de prácticamente la totalidad de la planta vegetal, incluyendo lo que desde el punto de vista de los biocombustibles de primera generación se consideran como residuos. Utilizar residuos implica que la ocupación de suelo es cero y que las emisiones por uso de fertilizantes desaparecen.

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

5 En la sección A.3 del Anexo de este documento se encuentra un análisis más detallado de los impactos medioambientales (disponible en www.fundacionideas.es).

biocombustibles con las emisiones GEI del ciclo de vida, comparándolos a una línea 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. Según nuestras estimaciones (más detalladas en el Anexo) que asumen un precio del petróleo de 120$/barril y tienen en cuenta el coste de la producción de los biocombustibles, el transporte de la biomasa, su conversión a biocombustible, y su almacenamiento y transporte hasta la estación de servicio, los biocombustibles de segunda generación, y algunos de primera generación, constituyen una solución efectiva para un futuro a corto plazo en ciertas regiones.

3.2 Utilización de la tierra y del agua

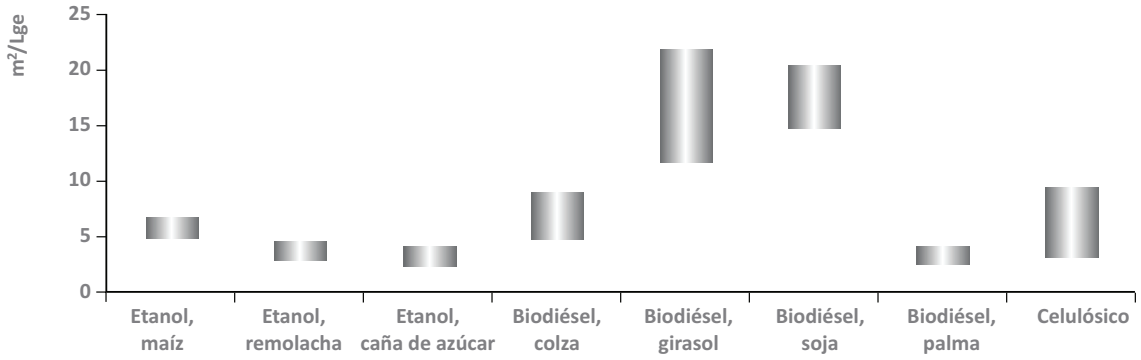
3.2.1 Co-impacto medioambiental de la utilización del suelo

Se ha atribuido a los biocombustibles parte de los incrementos en los precios de los alimentos, como consecuencia del desplazamiento de cosechas alimenticias en cosechas energéticas.La realidad es que hoy en día se estima que en el mundo aproximadamente el 2% de los terrenos arables se utiliza para la obtención de biocombustibles (UNEP, 2009). Además, el 90% de la producción de biocombustibles está localizada en muy pocas áreas geográficas: Estados Unidos, Brasil y algunos países de la UE, entre ellos España.

En el Gráfico 8 se representa la superficie de terreno arable necesaria para la producción de 1 litro de gasolina equivalente (Lge, IEA ETP, 2010). Es de destacar que algunos biocombustibles de primera generación hacen un uso importante de suelo, unos 20 m^2/Lge, especialmente el biodiésel procedente de la soja y del girasol, mientras que el bioetanol requiere una cantidad de terreno agrícola que es aproximadamente la tercera parte. Este es uno de los motivos, precisamente, por el que se argumenta, y estamos de acuerdo, que en lugares como España se debería dar más prioridad al bioetanol.

Además, los terrenos destinados a la producción de biocombustibles pueden ayudar a la mitigación de las emisiones de GEI de dos modos distintos: a) aumentando el carbono almacenado en las plantas y en los suelos extrayéndolo de la atmósfera, opción denominada “sumidero de carbono”; b) mediante la producción de biocombustibles como sustitutos de combustibles fósiles, conocida como “opción bioenergética”. Ambas opciones, que no son mutuamente excluyentes, pueden también incluir, al implementarlas, cambios directos e indirectos en el uso del suelo.

Gráfico 8. Intensidad en la utilización del suelo de diversos biocombustibles



Fuente: *Energy Technology Perspectives* (2010). *Scenarios and Strategies to 2050.* IEA (2010).

En particular, el factor iLUC *(Indirect Land Use Change)* se refiere a la destrucción indirecta de masa forestal para dedicarla a la producción agrícola de la biomasa necesaria para la producción de los biocombustibles. Estos efectos indirectos son difíciles de evaluar, pero varias instituciones se encuentran desarrollando normativas en este sentido[6].

Estudios de simulación mediante proyecciones de diversos modelos (IEA, 2009) demuestran que como consecuencia del iLUC *(Indirect Land Use Change)* se podrían reducir parcialmente los resultados obtenidos para la mitigación de GEI. Este sería el caso, por ejemplo, de las plantaciones de caña de azúcar en Brasil para la producción de bioetanol si éstas se llevan a cabo en terrenos originalmente dedicados a pastos para el ganado. En esta línea, en Europa no sería recomendable la reconversión indiscriminada de pastos y suelos herbáceos en terrenos para cosechas energéticas, y en el caso en que se hiciera, habría que tener en cuenta la asignación de emisiones GEI correspondientes a los procesos de conversión iLUC, ya que éstos anulan la capacidad de mitigación del carbono de los terrenos originales y, además, producen una deplexión del carbono almacenado en el suelo. Por el contrario, si las cosechas energéticas para biocombustibles se cultivan en terrenos agrícolas que han sido abandonados, las pérdidas de carbono en el suelo serían mínimas y el factor iLUC correspondiente podría ser incluso positivo.

En el escenario *Blue Map* (IEA ETP, 2010) se prevé en 2030 que cerca del 10% de los combustibles para el transporte procedan de biomasa y que dicha proporción sea

6 La Sección A.4 del Anexo (disponible en www.fundacionideas.es) analiza con más detalle las distintas normativas que se están desarrollando.

del 25% en 2050. Con objeto de alcanzar estas proporciones se requerirá una total comercialización de los biocombustibles de segunda generación, los cuales constituirán la mayor proporción de los biocombustibles. Para ello se ha calculado que se necesitarán cerca de 160 Mha de suelo.

Las cantidades de tierra necesaria no son en realidad tan grandes como en un principio pudiese parecer, ya que debemos tener en cuenta que los biocombustibles de segunda generación se pueden obtener a partir de residuos. Efectivamente, en la actualidad se producen unas 5Gt de residuos agrícolas secos que en 2030 podrían verse incrementados a 7Gt, junto con cerca de 1Gt de residuos forestales (IEA, 2010). Diversos cálculos indican que aunque solo se utilizase un 10% de estos residuos, sería suficiente para generar 120.000 millones Lge de etanol lignocelulósico y diésel BTL, lo que equivale a algo más del doble de la demanda de biocombustibles de 2008. Esto significaría, asumiendo el Escenario *Blue Map*, que en 2030 la casi totalidad de la demanda de biocombustibles podría generarse a partir de residuos agrícolas y forestales, lo cual evitaría la ocupación de terrenos adicionales.

3.2.2 Co-impacto medioambiental de la utilización del agua

Al analizar los impactos negativos de los biocombustibles en relación con la utilización del agua, hay que tener en cuenta que hay que compararlos con los impactos que se generan en la extracción y refino de los combustibles fósiles, procesos que como es bien conocido consumen una gran cantidad de agua (un barril de crudo puede requerir hasta 4 barriles de agua para su procesado), (véase *The Economist*, 5/8/2010).

El bioetanol de primera generación procedente del maíz en cosechas irrigadas consume en su producción una gran cantidad de agua, casi 15 veces la necesaria para la producción de gasolina y unas 10 veces más que el utilizado en el biocombustible E85. Sin embargo, tanto el bioetanol de segunda generación como los biodiésel consumen cantidades de agua similares a la gasolina. Ello es consecuencia del hecho de que en la producción de los biocombustibles de segunda generación se utiliza toda la planta y sus residuos. El caso del bioetanol producido a partir del *switchgrass* es particularmente interesante por la poca cantidad de agua que necesita para su desarrollo, por su gran eficiencia energética y porque puede crecer en terrenos que no compiten con los dedicados a la producción de alimentos.

Respecto a los co-impactos sobre el agua, también es importante señalar que la localización geográfica donde crece la biomasa necesaria para la producción del biocombustible es determinante (IEA ETP, 2010).

De hecho, la producción de biomasa para biocombustibles de segunda generación también 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. Por supuesto, en el caso de que se utilicen residuos no se requiere la aportación de agua adicional para el crecimiento de la planta, sino solamente la consumida en el procesado. Por ejemplo, en el caso del bioetanol, esta cantidad es de unos 8 litros de agua por litro de bioetanol de segunda generación.

3.3 Influencia de los biocombustibles sobre el precio de los alimentos

Una polémica en torno a los biocombustibles se refiere a las posibles implicaciones del aumento de su demanda para la evolución del precio de los alimentos básicos. La crisis alimentaria 2007-2008 puso esta cuestión en el centro del debate sobre la sostenibilidad futura de los biocombustibles. Los precios energéticos y de las materias primas no energéticas mostraron incrementos importantes, coincidiendo también en sus puntos de inflexión. Estos hechos coexistieron con el avance de la producción de etanol usando maíz en EE UU y de la producción de biodiésel de semillas oleaginosas en Europa. Sin embargo, si los precios de prácticamente todas las materias primas tanto agrícolas como industriales aumentaron sustancialmente, resulta paradójico asignar un papel importante en dicho proceso al desarrollo de los biocombustibles. Además, existen elementos suficientes relacionados con las malas cosechas, la reducción de los *stocks* y otros factores, que sugieren atribuir a los biocombustibles un papel muy moderado en el proceso.

Diversos trabajos han intentado medir el vínculo entre desarrollo de los biocombustibles y precios de los alimentos. La principal conclusión es que dicho vínculo opera a través del precio del petróleo. Por un lado, el aumento del precio del petróleo provoca un aumento en los costes de los fertilizantes y del transporte de las mercancías agrícolas, además de favorecer la volatilidad en los mercados financieros, y con ello la ejecución de coberturas de riesgos basadas en la adquisición de materias primas. Por otro lado, precios energéticos elevados incentivan la producción de biocombustibles. No es extraño, por tanto, que episodios de incertidumbre energética den lugar a alguna presión de la industria de los biocombustibles sobre los usos agrícolas. La evidencia al respecto parece apuntar en esta dirección, aunque de manera poco concluyente.

Hay diversos factores que explican el aumento de los precios de las materias primas alimenticias al margen de los biocombustibles, y que hacen que la evidencia sobre la causalidad del desarrollo de los biocombustibles sobre los precios agrícolas sea tan débil *(cf.* Banco Mundial, 2009, entre otros). En primer lugar, hay que destacar que los precios del trigo y el maíz ya habían registrado en el pasado (en 1981, 1983 y 1985) incrementos similares a los observados recientemente, y dichos picos se produjeron por motivos completamente ajenos a la producción de bioetanol. Además, los precios del maíz apenas se movieron durante el primer período de auge en la producción de etanol en los EE UU, y los precios de las semillas oleaginosas se redujeron cuando la UE aumentó el uso de biodiésel.

Por otro lado, diversos estudios apuntan que uno de los mayores motores de la subida del precio de los cereales ha sido el incremento en el consumo de carne mundial (por encima del 60% en las dos últimas décadas), especialmente en China e India, y la consiguiente demanda de pienso adicional (para la producción de 1 kg de carne se precisa un promedio de, al menos, 3kg de cereales). Esta situación se vio reforzada por malas cosechas (especialmente en Australia, Estados Unidos y Ucrania en 2007), y por los precios récord del petróleo. Según la FAO, el rendimiento agrícola ha sido muy pequeño en los últimos años debido a las malas condiciones climatológicas.

En todo caso, la seguridad alimentaria en los países menos desarrollados debe tener una importancia prioritaria. Los criterios de sostenibilidad adoptados por la UE han sido diseñados específicamente para evitar la competencia entre los alimentos y el desarrollo de los biocombustibles, enfatizando el papel y la importancia de los de segunda generación. En todo caso, conviene no olvidar que el hambre no es solo un problema de disponibilidad de alimentos, sino también de estabilidad política, de infraestructuras, de acceso al capital y a la educación.

4
Costes actuales y posibilidades para el futuro

4.1 Los costes actuales y el escenario para los próximos años

4.1.1 Análisis de los costes de la biomasa

Todos los estudios a nivel internacional, específicamente los elaborados por la IEA, señalan que el precio del petróleo seguirá en una senda ascendente debido a una combinación de mayor demanda, mayor escasez y mayor coste de su extracción. La ubicación de los yacimientos de petróleo, muchas veces en países con regímenes poco garantistas en términos de transacciones comerciales, actúa también como motor hacia la búsqueda de combustibles para el sector transporte menos dependientes del precio del crudo y que ofrezcan estabilidad de precios a largo plazo. En este sentido, la biomasa y la generación de biocombustibles a partir de ella, se plantea como una de las grandes apuestas de futuro para contrarrestar los problemas derivados del consumo de petróleo.

Sin embargo, frente a otros tipos de fuentes de energía renovable cuyo recurso es de libre acceso (sol, viento, etc.), y con la excepción de los residuos, el coste de la biomasa suele representar entre el 50%-90% del coste de producción de la bioenergía. Así, de forma general se suele tomar el rango 3-4 $/GJ como límite superior de costes de energía de la biomasa si se quiere lograr una fuerte expansión de este tipo de producción de energía en todos los sectores. Por otro lado, la utilización de residuos de la biomasa para otros fines, como alimento de animales, puede aumentar el valor del producto y disminuir el coste de producción energética, algo que no se contempla en este apartado. También hay que señalar que la estructura de costes depende en gran medida de la infraestructura previa de la que se dispone, así como de la tecnología empleada para cosechar. Además, la falta de transparencia en algunos mercados,

especialmente en el de recursos forestales, hace difícil asignar precios al recurso en el mercado.

Aun así, los costes de producción de biomasa forestal están muy establecidos, oscilando entre los 2,3-6,4 $/GJ para biomasa entregada en planta de valorización energética (IEA Bioenergy, 2009). Estos costes varían significativamente en función del país, y vienen afectados por las condiciones específicas de la plantación forestal, distancia al centro de valorización energética, técnicas de recogida y tratamiento de biomasa, etc.

4.1.2 Análisis de los costes de los biocombustibles

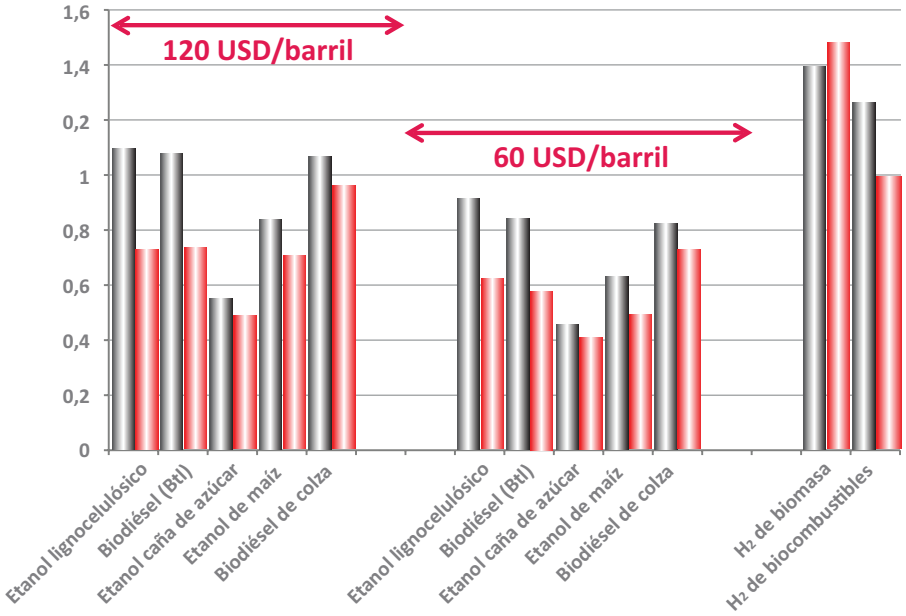
Los costes de producción de biocombustibles varían de forma considerable en relación con el tipo de materia prima utilizada, la eficiencia y complejidad de la planta de producción, el precio del barril de petróleo (tanto por su repercusión en costes de transporte como de precio de fertilizantes), y al número de horas que la planta opera al año (Gráfico 9). Por otro lado, no se sabe todavía con seguridad cuándo los biocombustibles de segunda generación (2G) serán comercialmente competitivos, pero la IEA en su Escenario WEO 2009-450 estima que será hacia el año 2015 (IEA ETP, 2010). Mientras, se van produciendo anuncios como el de la empresa Novozymes, que consiguió en marzo de 2009 alcanzar el coste de 1$/galón y espera llegar a los 0,5$/galón dentro del año 2010.

En este apartado nos centraremos, principalmente, en los costes de producción de biocombustibles 2G (lignocelulósicos), al considerar que son la gran apuesta de futuro en el desarrollo de esta fuente de producción de energía.

Así, según los últimos estudios realizados, el coste de inversión de plantas para la fabricación de biocombustibles lignocelulósicos con un rango de producción de 50-150 Ml/año se sitúa en los 125-250 millones de dólares, hasta diez veces por encima de lo que cuesta una planta de fabricación de biodiésel de primera generación (IEA/OCDE). Por otro lado, los suministros de la biomasa que actúa como materia prima oscilan en precio dependiendo del país y aumentan con el volumen requerido en la planta de producción de biocombustibles. Así, el coste de suministro de biomasa sobre el total se sitúa en el 10%-25%, pero puede alcanzar el 65% en localizaciones menos favorables.

Los costes de producción, en el caso de los biocombustibles 2G, se ven muy afectados por los costes de inversión (40%-50% del total), aunque también por los propios costes de suministro de biomasa (35%-42%, IEA ETP, 2010). Se estima que a

Gráfico 9. Evolución de costes de producción de biocombustibles y de hidrógeno a partir de distintos tipos de biomasa y de procesos



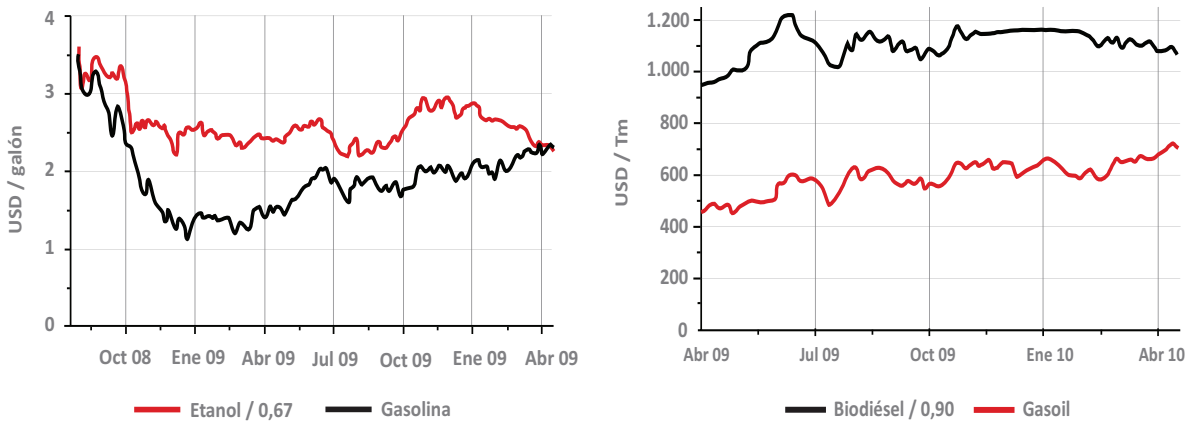
Fuente: Elaboración propia a partir de IEA.

largo plazo el porcentaje asignado a los costes de inversión disminuirá (al madurar la tecnología), con lo que el porcentaje asignado a los costes de suministro de la biomasa aumentará.

También resulta llamativo comprobar que hacia la mitad de 2008, cuando el precio del crudo alcanzaba su máximo histórico el precio del etanol y gasolina en el mercado de futuros se solapaban, manteniéndose claramente separados desde entonces hasta que, de nuevo en abril de 2010 se vuelven a solapar (Gráfico 10). Esto indica que ocurren episodios en los que resulta más barato comprar etanol que gasolina en los mercados de futuros. Para el caso del biodiésel no disponemos de datos históricos que nos puedan dar información del comportamiento desde el 2008, pero a partir de datos más recientes podemos deducir que la diferencia de precios con el gasoil se mantiene proporcionalmente muy elevada, aunque empezando a acercarse en los últimos meses.

Otros estudios confirman lo anterior (Gráfico 11), señalando que el coste medio del proceso de fermentación para generar etanol a partir del azúcar se encuentra en paridad con el de la producción de gasolina para un precio de barril entre 50 y 80 dólares. En cambio, el proceso de transesterificación para producir biodiésel ofrece

Gráfico 10. **Evolución de los precios de distintos combustibles en el mercado de futuros, corrigiendo la diferencia de poder calorífico entre ellos: (a) etanol frente a gasolina; y (b) biodiésel frente a gasoil**

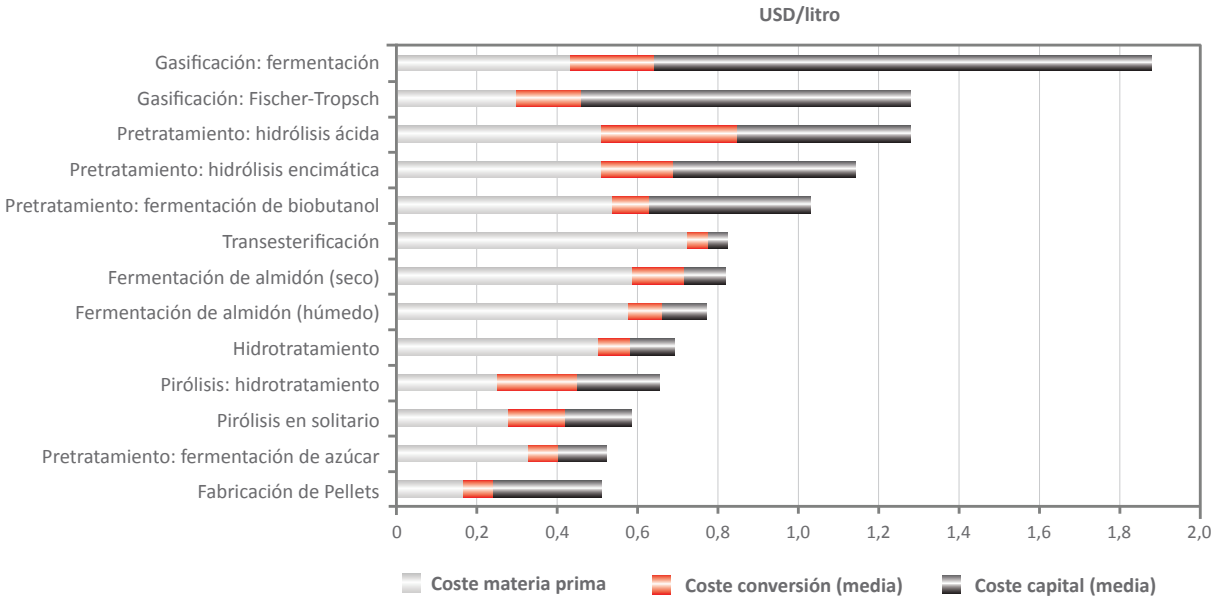


Fuente: Elaboración propia.

un coste medio superior. En dicho gráfico también se puede ver el coste medio de otros procesos en los que se obtienen biocombustibles 2G, así como el peso que tiene el coste de la inversión, el coste de la materia prima y el del proceso de conversión para la obtención de biocombustibles. Así, los procesos de hidrólisis ácida e hidrólisis enzimática (típicos para procesos de obtención de bioetanol de segunda generación) se sitúan en la zona de mayores costes, aunque es previsible que se reduzcan en el corto plazo.

En cuanto a los biocombustibles 3G, en el caso de las bioalgas, aún no hemos detectado datos contrastados sobre costes. No obstante, estudios iniciales indican que éstos son muy altos, considerando que actualmente no sería una tecnología competitiva con los precios de barril de petróleo incluso en el rango de los 100-200$. Por este motivo, se está tratando de reducir costes a través de la fabricación de co-productos (comida para animales, productos químicos, pigmentos...) en el proceso de obtención de biocombustibles. Sin embargo, se plantea que el valor aproximado actual de estos co-productos (0,92–1,84$/l) puede verse fuertemente mermado si la producción de algas para biocombustibles aumenta de forma sustancial. Así, debe hacernos reflexionar el hecho de que el volumen de mercado global de microalgas asciende a 1.250 millones de euros, lo que implica un precio medio de 250€/kg. Si comparamos este precio con el de aceite de palma (para la generación de biodiésel), en este segundo caso la producción alcanza los 40 millones de toneladas, con un precio de mercado de 0,50€/kg (Steen *et al.,* 2010). Por tanto, la producción de microalgas necesita aumentar mucho en volumen y reducirse mucho en precio.

Gráfico 11. Cálculo de costes *(LCOE: levelized cost of energy)* de combustibles para transporte obtenidos a partir distintas tecnologías



Fuente: Bloomberg New Energy Finance.

En cuanto a los costes de producción actuales de hidrógeno, éstos son muy elevados (Gráfico 11) y condicionados por la evolución de los precios del carbón y del gas natural (muy volátil en este caso), dado que son las materias primas de las que se obtiene casi en su totalidad. También se deben considerar otros factores que aumentan o disminuyen el coste final del hidrógeno: (i) aprovechamiento del oxígeno producido; (ii) transporte del hidrógeno; y (iii) almacenamiento de hidrógeno centralizado.

De acuerdo con distintos trabajos publicados en revistas científico-tecnológicas sobre los costes de producción de hidrógeno con tecnologías alternativas al carbón y al reformado de metano en instalaciones centralizadas, en valor a 2009, se observa que la tecnología renovable que se encuentra más cerca de la paridad con la producción de hidrógeno a partir del carbón es la gasificación de biomasa. En instalaciones descentralizadas (las más adecuadas para su desarrollo para abastecer de hidrógeno al sector transporte) se comprueba que la tecnología renovable más cercana a la paridad es la que utiliza biocombustibles, produciéndose la paridad entre los costes de producción de hidrógeno descentralizado por SMR y fuentes renovables a mediados de esta década.

4.2 Otras alternativas para el transporte

4.2.1 Biocombustibles frente al vehículo eléctrico

El vehículo eléctrico (VE) representa un concepto radicalmente distinto del vehículo de combustión interna (ICE) alimentado por biocombustibles, ya que no contamina si la electricidad es de origen renovable y permite almacenar excedentes de energía eléctrica. Sin embargo, el VE requiere inversiones costosas e implementación de tecnologías poco experimentadas. Además, el VE se enfrenta a limitaciones como el aumento de costes que implica incrementar el recorrido entre recargas, la lentitud del proceso de carga, la falta de una infraestructura para ello, el elevado peso y volumen de las baterías, o el alto coste del vehículo. Por el contrario, en el caso de los biocombustibles pocas modificaciones son necesarias respecto de los vehículos actuales, y la distribución del combustible es muy similar. Por estos motivos, antes de la introducción masiva del vehículo completamente eléctrico, se cree que entrarán en el mercado los denominados PHVE *(Plug-in hybrid electric vehicle),* los cuales son similares a los actuales híbridos, pero con una serie de baterías (recargables directamente con conexión del vehículo a red eléctrica, además de a través del motor de combustión interna), no tantas como las de los VE, que les permita hacer recorridos de unos 40-80 km en el modo eléctrico y el resto (hasta unos 500 km) con combustibles fósiles. De esta forma, los escenarios en 2050 de la IEA recientemente publicados (IEA ETP 2010), predicen que los VE no jugarán un papel significativo hasta la década de 2030, y que su introducción generalizada ocurrirá más tarde en el tiempo que la de los vehículos que utilicen biocombustibles.

Veamos los detalles. La IEA estima que a corto plazo el coste de las baterías se situará entre los 600-800$/kWh. Esto significa que para los 30 kWh que típicamente necesita un vehículo eléctrico para poder recorrer 150 km, solo las baterías costarían entre 18.000-24.000$ por vehículo. Se espera que con I+D este coste pueda disminuir a 300$/kWh entre 2015 y 2020 asociado a un importante volumen de producción, y que pueda ser cubierto mayoritariamente con los ahorros en energía (3.000-5.000$ por vehículo), y en la colocación del motor de combustión. Aun así, se estima que con un coste de batería de 420$/kWh en 2015 un vehículo eléctrico híbrido con una batería que le permitiera cubrir 40 millas antes de ser recargado podría costar inicialmente unos 11.800 dólares más que uno estándar ICE, y si el vehículo es totalmente eléctrico con capacidad para cubrir 100 millas, el coste se incrementaría en 24.100 dólares (McKinsey & Co., 2010). A esto hay que añadir el coste de la infraestructura de recarga de los vehículos. En este sentido, hay que considerar que los vehículos eléctricos solo entrarán en el mercado del transporte terrestre si, al menos, un 10% del parque de vehículos tienen esta tecnología (McKinsey & Co., 2010).

El VE implica, además, reformar dramáticamente los sectores de la construcción de vehículos, baterías, plantas eléctricas y redes de transporte, con el riesgo de que impulsar demasiado pronto o demasiado tarde el VE puede inducir grandes desajustes en sectores importantes de la economía:

- Constructores de vehículos: el ICE y la transmisión son el corazón de esta industria, habiendo subsidiarizado la mayoría del resto de componentes. Por tanto, los constructores de vehículos van a tener que reinventarse para mantenerse en el mercado. También tendrán que mirar más allá y prever cómo se establecerá el proceso de recarga de baterías. Relacionado con esto, es previsible que tengan que segmentar el mercado en función de las prestaciones que se desean del vehículo, dado que los requerimientos (y costes) de baterías varían considerablemente entre vehículos destinados a desplazamientos urbanos y a comunicaciones a media distancia (Hodson y Newman, 2009).

- Baterías: este sector va a crecer de forma muy importante, pero el valor de la tecnología cambiará desde la química de la celda a los sistemas de empaquetado y la electrónica que optimice el comportamiento de la batería en cada vehículo. También se mantiene abierta la forma en la que encauzar el reciclado de baterías con ciclo de vida agotado.

- Plantas eléctricas y redes de transporte: los costes por unidad de generación aumentarán en el corto plazo, al tener que admitir la inyección de energías renovables no gestionables (solar y eólica) y derechos de emisión de carbono. Sin embargo, los coches eléctricos crean nuevas fuentes de ingresos, para lo que habrá que instalar contadores inteligentes que incentiven la recarga nocturna si no quieren verse obligados a tener que reforzar las redes de transporte y distribución de electricidad.

Por otro lado, los motores eléctricos más eficientes pueden convertir más del 95% de la energía eléctrica en trabajo útil, siendo el resto pérdida principalmente en forma de calor, y produciendo ahorros de un 1-12% en energía con respecto a motores ineficientes. Sin embargo, los motores ineficientes pueden llegar a perder hasta el 50% de la energía eléctrica. Los motores más eficientes son más costosos y mayores que los menos eficientes, por lo que no es trivial su elección para transporte.

Además, hay que considerar que los costes de producción de baterías se pueden incrementar bastante si se producen tensiones en el mercado de materias primas. Ejemplo de esto es la decisión del Gobierno chino en julio de 2010 de reducir en

un 40% las exportaciones de tierras raras, combinado con tarifas a la exportación entre un 10%-25%. China produce actualmente el 97% de todas las tierras raras que se producen en el planeta. Una batería de un coche eléctrico actual requiere más de 10kg de lantano (tierra rara). Esto no afectaría a las baterías de ion litio, que no requiere tierras raras de China, pero el litio también se produce solo en unos pocos países, lo que está generando preocupación en relación con su suministro.

También hay que considerar que el transporte mediante coche eléctrico produce emisiones de CO_2 en las centrales convencionales de producción de electricidad, mayores o menores en función del *mix* de energía eléctrica que utilice. Esto no ocurre con vehículos ICE impulsados por biocombustibles que permitan ganancias en términos de emisiones de CO_2 evitadas. De esta forma, los beneficios en emisiones de CO_2 por la introducción del vehículo eléctrico son distintos en función del *mix* eléctrico del país a considerar. Así, en el caso de los países del G-8, la producción de CO_2 por unidad de energía eléctrica producida varía dentro de un rango muy grande, desde un máximo de 625g/kWh de los EE UU a tan solo 240g/kWh.

El empuje del coche eléctrico no solo viene dado por el interés en reducir la contaminación atmosférica de las áreas urbanas, sino también viene planteado por la necesidad de regular las curvas de demanda de los sistemas eléctricos actuando como acumuladores de energía, lo que tiene interés para la reducción de los costes de generación de electricidad.

Esta función del VE como acumulador nocturno de energía eléctrica también permitiría mejorar la penetración de la energía producida por fuentes renovables no gestionables en la red eléctrica (*EcoGrid*, 2008), dado que la energía excedentaria podría ser almacenada en las baterías de los VE que se encontraran recargando. De forma inversa, también sería beneficioso utilizar la energía acumulada en las baterías de los VE que dispusieran de carga acumulada y estuvieran conectados a red, para cubrir picos de demanda de los sistemas eléctricos que se plantearan como más costosos cubriéndose mediante otras opciones.

En cuanto a las previsiones de costes totales por km con respecto a VE e ICE, éstas varían dependiendo de las prestaciones y del país en el que se desarrollan los vehículos. Al respecto, hay que considerar que también se están realizando grandes esfuerzos en mejorar la eficiencia de los motores de combustión interna. De hecho, la *Global Fuel Economy Initiative* se ha propuesto la reducción de un 50% de la intensidad energética de los vehículos en 2030 en relación con 2005. Así, si comparamos la UE y EE UU (McKinsey & Co., 2010), las previsiones para el período 2013-15 son las que se exponen en la Tabla 4.

Tabla 4. Coste total por km de operación en dólares en el período 2012-15*

Tipo	País	Km	Mantenimiento	Fuel	Depreciación coche	Depreciación batería	Total $/km
ICE avanzado	UE	-	0,04	0,12	0,16	-	0,32
PHEV	UE	60	0,04	0,04	0,18	0,03	0,29
EV	UE+USA	160	0,03	0,02	0,16	0,07	0,28
PHEV	USA	60	0,04	0,02	0,18	0,03	0,27
ICE avanzado	USA	-	0,04	0,04	0,16	-	0,24

* Se asume un coste de combustible de 3,00$/galón (USA) y 1,69$/litro (UE), coste de batería de 500$/kWh, coste de propiedad calculado para los 5 primeros años, 20.000 km recorridos al año, vehículo estándar con un coste de 20.000$ (Volkswagen Golf) antes de motor, transmisión, batería, etc., ICE (motor de combustión interna) avanzado 30% más eficiente que el Volkswagen Golf de 2008.
Fuente: DOE.

De todas formas, la componente política en la elección es una pieza fundamental. Así, el Gobierno de España considera al vehículo eléctrico como una apuesta estratégica dentro de la posibilidad de que la producción de energía primaria para electricidad pueda pasar del 22% actual a un 60%. Además, el Gobierno de España ha llegado a expresar que valora la no contaminación del vehículo eléctrico en las grandes ciudades y el que los ahorros de compra de energía primaria del exterior (gas natural, petróleo…) podrían compensar incluso todo el desmantelamiento del sector de producción de vehículos en España (de acuerdo con la opinión expresada por el actual secretario de Estado de Energía en su conferencia de 25 de julio de 2010 en Tenerife).

4.2.2 Biocombustibles frente a otras alternativas

En relación con el vehículo impulsado por hidrógeno, como ya se ha señalado en la sección anterior, los sistemas de producción de hidrógeno que se consideran más adecuados para el sector transporte son los descentralizados, y la forma más barata de producir hidrógeno con este tipo de sistemas es utilizando biocombustibles como materia prima. Este dato reduce de forma muy importante la competencia del hidrógeno hacia los biocombustibles para su aplicación en el sector transporte en el corto y medio plazo.

Por otro lado, los vehículos eléctricos basados en la acumulación de energía eléctrica procedente de fuentes renovables en baterías resultan ser más eficientes que

los que utilizan pilas de combustibles alimentadas con hidrógeno procedente de producción de electricidad a partir de fuentes renovables. Así, la electricidad en procesos de carga y descarga en baterías tendría una eficiencia global de un 86%, mientras que el producto de eficiencias del proceso de electrólisis del agua (70%), compresión de hidrógeno (90%) y producción de electricidad mediante pila de combustible (60%) da una eficiencia media del 38%. Esto no implica descartar el hidrógeno si procede de procesos distintos de la electrólisis del agua (gasificación de la biomasa o reformado de biocombustibles, como se ha señalado en la sección anterior), donde se puede llegar a alcanzar un proceso de producción competitivo si se reducen los costes con nuevos avances tecnológicos. Por último, el etanol cada vez está más cerca de poder ser utilizado como combustible en pilas de combustible a la vez que produciendo acetato como residuo, con un importante valor en la fabricación de plásticos y medicinas.

Respecto a otras alternativas energéticas para el transporte, como vehículos impulsados por combustibles alternativos como gas natural comprimido y gas licuado derivado del petróleo (principalmente propano), pero al ser impulsados por energía fósil, no se pueden considerar una alternativa de cara al futuro si se quieren evitar emisiones de CO_2 y dependencia del petróleo o del gas natural. Además, la evolución del número de unidades de este tipo de vehículos en mercados como el de EE UU nos demuestra un estancamiento o disminución de los mismos. Algo similar ocurriría con la posibilidad de convertir carbón en combustible líquido (proceso de Fischer-Tropsch), alternativa que podría plantearse ante un *shock* severo en los suministros de petróleo en muchos países con reservas de carbón importantes (como ocurrió en Alemania durante la Segunda Guerra Mundial).

Por último, vale la pena hacer una breve mención (casi anecdótica) de la situación en la que se encuentra el desarrollo de vehículos impulsados por energía fotovoltaica en comparación con el vehículo eléctrico. A modo de ejemplo, se puede señalar que el pasado 11 de noviembre de 2009, el coche solar construido por la Universidad Takai de Japón ganó el *Global Green Challenge* en el cual vehículos impulsados exclusivamente por energía solar tienen que recorrer los 3.000 km que separan Darwin de Adelaida (Australia). El vehículo mantuvo una velocidad media superior a 100 km/h durante el recorrido, siendo abastecido por 1,8 kW de células multiunión (30% de eficiencia) que son utilizadas para aplicaciones espaciales y que ocupaban una superficie de 6 m^2 (límite máximo del evento) (*Renewable Energy Focus,* 2009). Tras analizar las características de este tipo de vehículo y su coste, se puede concluir que la opción del coche impulsado por energía solar está extremadamente lejos de ser una opción de futuro, pero el aporte energético logrado mediante energía solar puede ser una opción interesante en todo tipo de vehículos, no solo eléctricos, dado el cada vez

mayor consumo de electricidad en ellos debido a las exigencias de cada vez mayores prestaciones que requieren de electricidad.

4.3 Riesgo de costes en el *mix* de combustibles

La diversificación energética sirve para conseguir un *mix* de combustibles con menor riesgo de costes. En este sentido, combinar tecnologías complementarias permite reducir la incertidumbre sobre la evolución de los costes de la cartera de combustibles de un país. De acuerdo con nuestro análisis, en el futuro dicha complementariedad debería darse entre los biocombustibles de segunda generación y la electricidad, dando lugar a una diversificación muy efectiva. Por el contrario, combinar alternativas tecnológicas con patrones de costes muy similares, como podrían ser el diésel y la gasolina, ayudaría muy poco a reducir el riesgo global de la cartera. En esta sección ilustramos esta idea a partir de un sencillo ejercicio cuantitativo que se basa en la aplicación de los métodos utilizados en finanzas para ponderar el coste y el riesgo de distintos activos financieros, de acuerdo con la Teoría de Carteras Eficientes de Markowitz (1952).

Diversos autores (Awerbuch y Berger, 2003; o Marrero y Ramos-Real, 2010, entre otros) han considerado la doble dimensión coste-riesgo como herramienta para la planificación energética en la generación de electricidad. De acuerdo con este enfoque, lo relevante es analizar el conjunto de la cartera energética, en vez de comparar uno a uno los costes medios u otros aspectos individuales de los componentes de la cartera. Además, incorporar la incertidumbre en la evolución de los costes permite a la planificación energética contribuir a limitar el riesgo de suministro.

La aplicación de estos métodos al *mix* de combustibles sugiere que a corto-medio plazo lo eficiente sería que los combustibles convencionales (gasolina y diésel) se complementasen con los biocombustibles de primera generación (producidos a nivel nacional), los biocombustibles importados más competitivos (por ejemplo, el etanol de Brasil), y con la cuota existente de biocombustibles de segunda generación y de electricidad para automoción, pero especialmente con los dos primeros. Por supuesto, las posibles combinaciones en la cartera están sometidas a restricciones tecnológicas ineludibles a corto-medio plazo, pero que podrían relajarse a largo plazo. Por ejemplo, parece razonable suponer en el corto-medio plazo que: i) al menos un 50% del *mix* seguirá siendo gasolina-diésel; ii) como máximo el 20% será biocombustible de primera generación; iii) tanto el biocombustible importado; iv) como el de segunda generación no representarán más del 10%; y v) como máximo el 15% del *mix* corresponderá a vehículos eléctricos. Para que el ejercicio sea transparente vamos a

obviar aquí la importantísima restricción adicional que imponen las políticas presentes y futuras de reducción de emisiones.

El punto de partida es la información sobre costes que hemos presentado en la sección 4.1, Gráfico 8. A partir de dicha información obtenemos una medida de coste medio de cada combustible en $/GJ, y consideramos cuatro posibles escenarios: corto-medio plazo frente a largo plazo, combinados con petróleo barato (60$/barril) o petróleo caro (120$/barril)[7]. La cartera de combustibles vendría definida por los pesos de las distintas posibilidades (X1,..., X5 correspondientes a (1) a (5) anteriores); que están entre cero y uno, y suman uno. El coste promedio de la cartera, $\overline{CC} = X_1 \cdot C_1 + \ldots + X_5 \cdot C_5$, pondera los distintos costes medios por dichos pesos. Además, incorporamos al problema de decisión los límites tecnológicos a los que acabamos de referirnos. A corto-medio plazo, 0,5<X1<1 para convencionales (al menos 50% de gasolina-diésel), 0<X2<0,2 para biocombustible nacional de primera generación, 0<X3, X4<0,1 tanto para biocombustible importado (etanol de caña de Brasil) como de segunda generación (etanol lignocelulósico), y 0<X5<0,15 para vehículo eléctrico. A largo plazo los límites son más flexibles, con la excepción del etanol de caña importado, que tan solo sube al 20% del total del *mix*, es decir, 0<X1<1; 0<X2<1; 0<X3<0,20; 0<X4<1; 0<X5<1.

Si nos limitamos a minimizar el coste medio de la cartera, obtendríamos una cartera concentrada en el combustible más barato. Sin embargo, el resultado que obtenemos al considerar el riesgo de la cartera no es tan obvio. La cartera de mínimo riesgo no tiene que estar necesariamente concentrada en la alternativa de costes menos volátiles. La variabilidad (el riesgo) de la cartera depende de la variabilidad individual de cada tecnología, pero también de las interrelaciones entre los costes de las diferentes tecnologías. Cuanto menor sea el grado de correlación de sus cos-

7 El ejercicio que hacemos se centra en los costes de combustibles por GJ y no por kilómetros recorridos, que sería lo realmente relevante. Pero esto último requeriría hacer supuestos acerca de las eficiencias de motores, etc. lo cual va más allá del objetivo de este trabajo, especialmente considerando que el motor eléctrico está muy cerca de su máximo de eficiencia, mientras que el motor de combustión interna aún puede mejorar en eficiencia de forma muy considerable. Tampoco considera, por ejemplo, el coste de la tecnología necesaria para que funcione el combustible (las baterías en el caso del coche eléctrico o las modificaciones tecnológicas de un coche que use biocombustibles). Además, la información sobre costes de biocombustibles es más imprecisa que sobre costes de combustibles convencionales. Por último, para los vehículos eléctricos tomamos como referencia los siguientes datos: consideramos un consumidor tipo C2 (consumo medio de 9.000 kWh/año, con discriminación horaria y 6,6 kW de potencia contratada) con comercializadora de último recurso, lo que le resulta un precio medio de electricidad de 0,12933 €/kWh (CNE, mayo 2010) lo que, aplicando el cambio medio $/€ (BCE, 5.01.2009 – 30.12.2009) = 1,3946, se convierte en 50,101 $/GJ.

tes, 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 este sentido, tal y como ya adelantamos al comienzo de la sección, 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.

¿Qué es una Frontera Energética Eficiente (FEE, véase el Apéndice técnico, Guerrero *et al.,* 2010)? En cada uno de los puntos de la FEE se estaría minimizando una de las dimensiones (coste o riesgo), dada la otra. Por supuesto, de entre todas las carteras eficientes, la elección óptima depende de las preferencias del gestor de política energética entre coste medio y riesgo. Lo que está claro es que no estar sobre la FEE implica ser ineficiente, ya que, mediante cambios en el *mix*, se podría mejorar una dimensión sin necesidad de perjudicar a la otra.

Considerados los costes medios, las varianzas de costes individuales, las correlaciones entre los costes de las distintas alternativas y los límites tecnológicos, la Tabla 5 muestra que la cartera de Mínimo Coste (MC) sobre la FEE 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 (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% en el corto-medio plazo, y 0% 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% en biocombustibles de primera generación, un 10% de segunda, un 10% de importación y un 15% de eléctrico. En el largo plazo, la electricidad y los biocombustibles se reparten casi un 50% cada uno. Eso sí, dentro de los biocombustibles, existe cierta diver-

Tabla 5. 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, 1ª generación	0	15	10,1	0	3,5	18,9
Bio, importación	0,6	10	10	0,2	14,6	20
Bio, 2ª 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, 1ª generación	0	15	13,7	72,1	8,4	6
Bio, importación	10	10	10	20	15,1	19,3
Bio, 2ª generación	0	9,9	0	0	22	21,9
Electricidad	9,2	15	15	7,9	54,5	52,8

Fuente: Elaboración propia.

sificación entre la importación, y la producción de primera y de segunda generación, siendo esta última la que mayor peso se lleva (entre un 20% y un 30%).

Por último, en la tabla también 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 que tiene la coexistencia de los biocombustibles en sus tres formas (primera generación, importación y segunda generación) 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 an 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 (120$/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

Implicaciones de política económica, energética y medioambiental

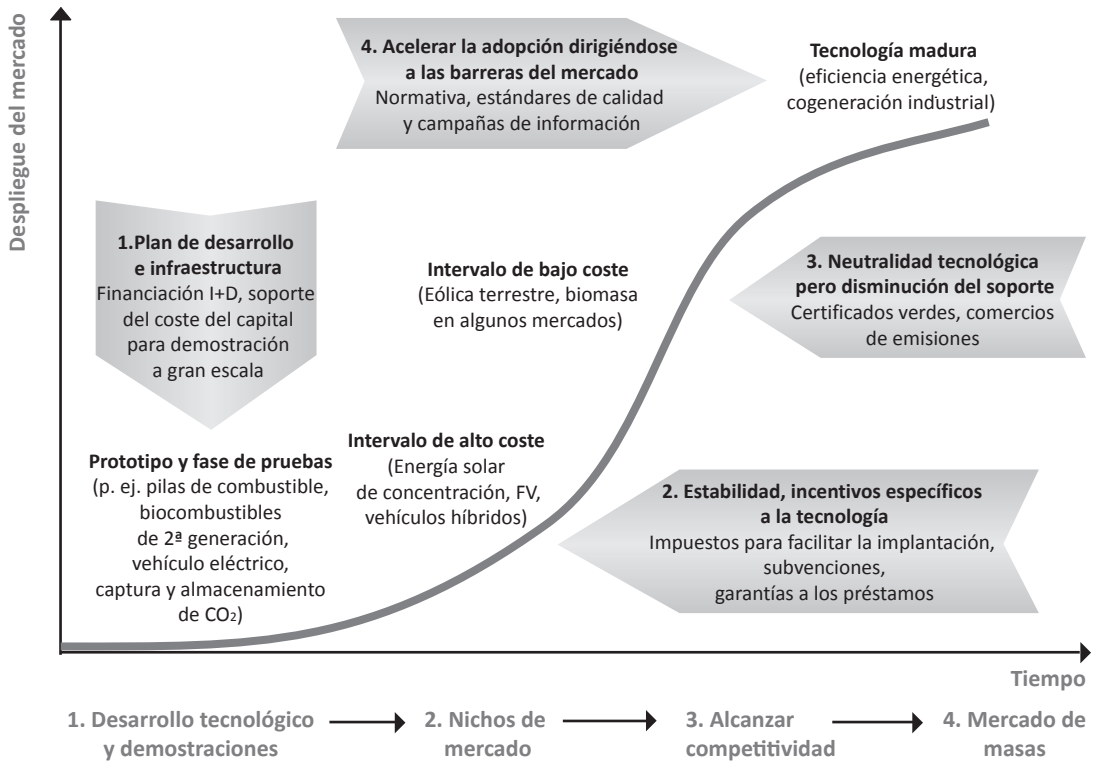
5.1 Normativas y políticas de promoción

La importancia de las normativas y políticas de promoción en relación con la utilización de los biocombustibles se derivan principalmente del hecho de que se atribuye al transporte aproximadamente la cuarta parte de las emisiones de gases de efecto invernadero (IEA ETP, 2010). Además, los futuros escenarios de la IEA contemplan que el esfuerzo principal para la reducción de emisiones debe realizarse en el sector transporte, aún más que, por ejemplo, en los sectores industriales o en el de la edificación.

Las políticas que se están desarrollando para llevar a cabo una transición a tecnologías bajas en carbono son muy variadas, oscilando entre aquéllas que priman la utilización de energías renovables y biocombustibles, hasta aquéllas que ponen un precio a las emisiones GEI. Por supuesto, una política que también ha sido utilizada tradicionalmente por los distintos gobiernos es la basada en la financiación de proyectos de I+D.

Es interesante observar en los escenarios 2030-2050 elaborados por la IEA-OCDE que de todas las tecnologías renovables dirigidas a la consecución de una economía sostenible, los combustibles de segunda generación figuran en el Estadio 1 (Gráfico 12, IEA ETP, 2010) que se refiere a aquellas tecnologías que siendo muy prometedoras, no han alcanzado todavía la madurez suficiente. Por este motivo se recomienda a los gobiernos que las promocionen económicamente mediante la concesión de proyectos de investigación, y de ayudas financieras para la construcción de plantas de demostración a gran escala.

Gráfico 12. Políticas de promoción de las tecnologías de emisiones bajas en carbono. En ella se indican los estadios que sigue el desarrollo de las tecnologías



Fuente: IEA-OECD.

La comprensión del estado de la cuestión exige una revisión de las normativas y políticas de promoción en relación con el transporte y los biocombustibles en diversos países y áreas geográficas[8]. En particular, es interesante conocer la situación en la UE y en EE UU por ser las más desarrolladas y constituir el ámbito comercial más importante para nuestras empresas.

5.2 Coordinación de políticas: I+D, mercados y regulación

Un argumento central de esta monografía se refiere a que el logro de una tecnología energética sostenible pasa por el desenvolvimiento de las fuerzas del mercado, de la actividad del regulador y de los incentivos adecuados a la actividad innovadora en

8 En el Anexo que se encuentran en la página web (www.fundacionideas.es) se explican en detalle las normativas y políticas de la Unión Europea, Estados Unidos, China e India.

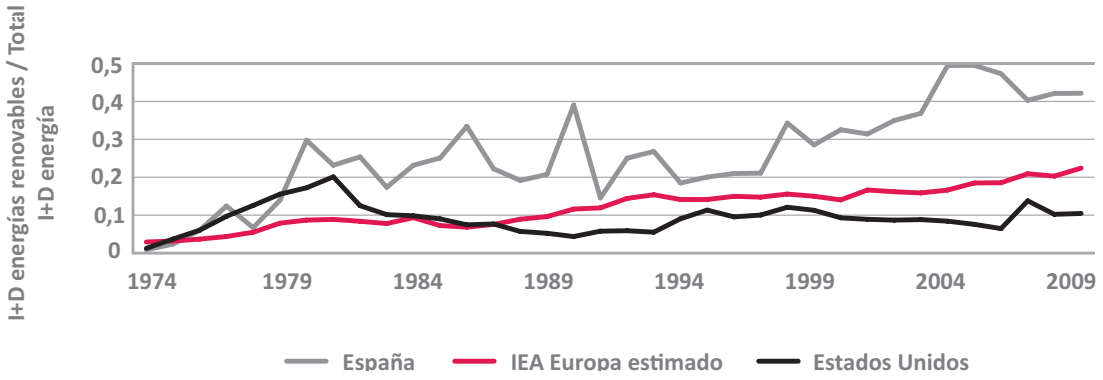
materia energética. Los incentivos a la innovación incluyen sin duda las oportunidades de negocio que brinda estar en condiciones de empujar la frontera tecnológica en materia energética. Pero no se puede olvidar que la naturaleza de bien público que tienen el clima y la seguridad de suministro de combustibles y la externalidad asociada a las emisiones GEI justifican tanto la regulación, por un lado, como el apoyo a la investigación básica, por otro. En efecto, buena parte de la investigación fundamental en este campo es difícilmente apropiable por las empresas y está sometida a un extraordinario grado de incertidumbre en las condiciones de mercado, cuyo interés es esclavo de las oscilaciones en el precio del petróleo. Además, la externalidad climática, por ser global, de largo plazo y de consecuencias inciertas sugiere que no actuar puede ser caro y arriesgado, como analiza Terceiro (2008), y exige un nivel de coordinación de las políticas que reclama, como apunta Guesnerie *et al.* (2003), las herramientas de la teoría del diseño de mecanismos (véase Moselle *et al.* eds., 2010), sobre algunos de estos temas bajo un enfoque relacionado, aunque centrado en el sector eléctrico).

Nuestros objetivos en este apartado son bastante más modestos en todo caso: ¿Qué características tiene el marco inversor e innovador en que se desenvuelven los biocombustibles? ¿Cómo se ve afectado por la situación en los mercados y la normativa regulatoria y de apoyo al I+D?

La Agencia Internacional de la Energía estima que actualmente se dedican 740 millones de dólares anuales a I+D en bioenergía [combustión de biomasa y producción de biocombustibles), estimando que sería adecuado que el rango de inversiones se situara entre los 760 a 2.300 millones de dólares (IEA, 2010)]. Por otro lado, mientras que EE UU y Reino Unido son los líderes en términos generales, Brasil lidera el esfuerzo en I+D en biocombustibles, mientras que Finlandia lidera la I+D en combustión de biomasa. De acuerdo con el informe del JRC-EC (2009), las actividades de I+D por parte de empresas dedicadas a los biocombustibles en la UE se estima que alcanzaron los 269 millones de euros, a partir del análisis de 23 empresas del sector.

Más en general, de acuerdo con los datos de la IEA, el Gráfico 13 muestra que el ratio de I+D en energía renovable sobre el total de I+D energético privado se sitúa en España por encima del ratio registrado en el resto de Europa y en EE UU. Esta observación puede justificarse en parte por la dependencia que tiene España como país importador en el ámbito de las energías de origen no renovable. En el caso de España, la mayor parte de los fondos de I+D renovable ha ido a parar de manera estable en los últimos años a la energía solar en torno a un 60% del total, mientras que eólica y bioenergía se reparten del resto prácticamente un 20% cada una, y solo en los años posteriores al segundo *shock* del petróleo el reparto fue a favor de la

Gráfico 13. Evolución de la cantidad de recursos destinados a I+D de energías renovables respecto del total destinado a energía



Fuente: Elaboración propia a partir de estadísticas IEA.

bioenergía. La situación en EE UU, por ejemplo, es bien distinta en los últimos años. Hasta mediado de los noventa los fondos dedicados a energía solar captaban un 60% del total de I+D en energía. Sin embargo, el cambio de la tendencia desde la primera guerra del golfo, y especialmente el impulso posterior a 2001, han situado la bioenergía en el entorno del 40% en el reparto de fondos, mientras que la parte de solar se ha reducido progresivamente hasta cifras cercanas al 20%.

En cuanto a los resultados esperados de esta actividad de I+D, el avance más importante en el campo de la bioenergía consiste en encontrar el proceso que permita convertir la biomasa rica en celulosa en energía usable a bajo coste. También resulta necesario desarrollar ciclos de bioenergía que sean sostenibles, a la vez que metodologías y estándares que aseguren precisamente esa sostenibilidad. Más concretamente, el desarrollo de patentes en el sector de los biocombustibles está centrado, principalmente, en la obtención de biocombustibles de segunda y tercera generación. La 2G solo es posible sobre una sólida base de 1G, puesto que están destinadas a coexistir hasta 2030. En ese sentido, las patentes se organizan fundamentalmente en torno a: (i) nuevas enzimas y procesos de producción de etanol de segunda generación; (ii) gasificación y procesos Fischer-Tropsch para biodiésel de segunda generación; (iii) nuevos procesos en biorefinerías; y (iv) desarrollo de reactores para la producción de algas.

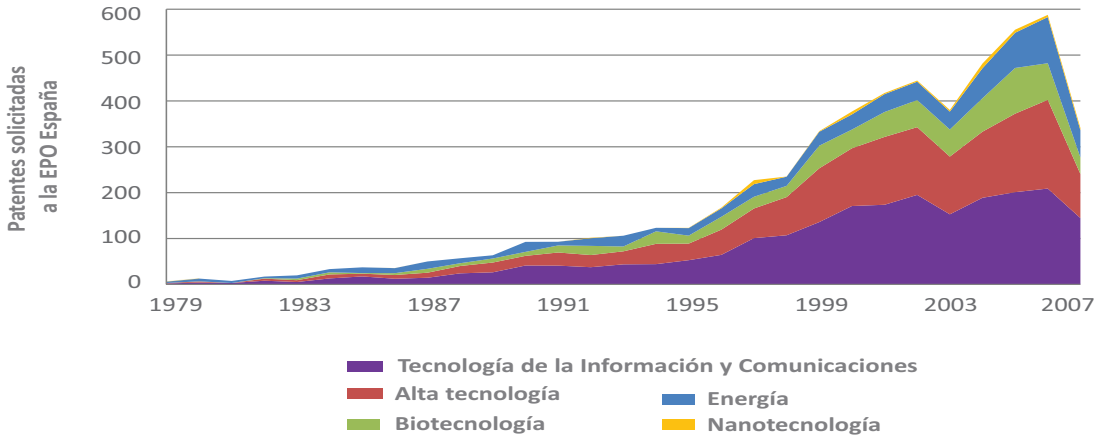
Los países con más patentes en biocombustibles (1998-2007) resultan ser EE UU (135), Alemania (133), Japón (112), Francia (45) y Reino Unido (27), precisamente los países de los que proviene la mayor parte de la creación de innovaciones científicas y tecnológicas. A partir de aquí, el resto de países tienen contribuciones modestas, también

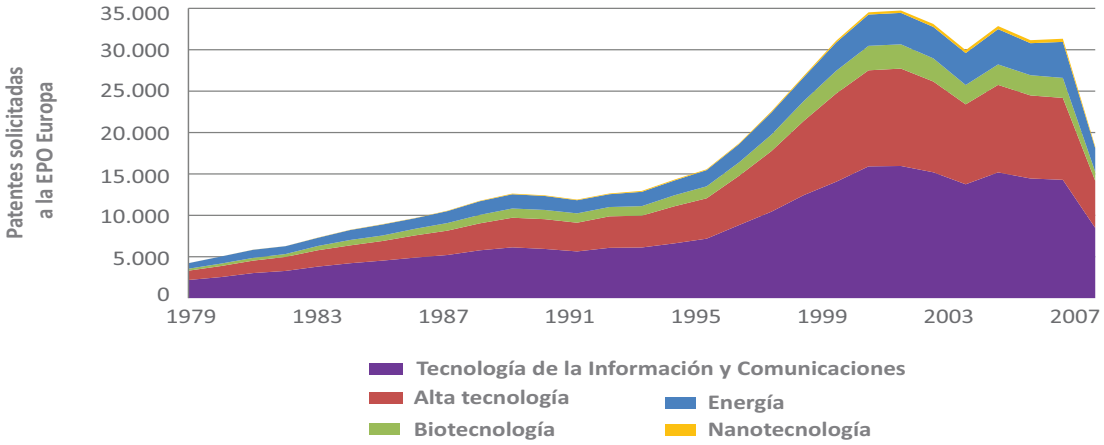
en biocombustibles. En particular, España (6) se situaría en el puesto 16, igualada con India y por encima de Brasil (5), que parece más centrado en procesos de producción que de desarrollo tecnológico. En otras tecnologías limpias, España se sitúa a nivel mundial: eólica (5ª); solar térmica (9ª); hidromarina (12ª); solar fotovoltaica (16ª); y geotérmica (19ª). Si comparamos entre España y Europa a partir del registro en la *European Patent Office,* el Gráfico 14 muestra que al menos bajo esta métrica, nuestro *output* innovador no está a la altura del peso de nuestra economía, puesto que no alcanza el 2% de las patentes presentadas en Europa en las cinco áreas más activas, entre las que destacan el sector de las tecnologías de la información y comunicación (TIC) y el de alta tecnología. La buena noticia es que las patentes presentadas en energía han ido aumentando en el tiempo aunque en biocombustibles representan solo el 3,5% del total en tecnologías limpias. La evidencia sugiere que el número de patentes en biocombustibles a nivel mundial aumenta en respuesta a los incrementos del precio del petróleo (véase UNEP, EPO e ICTSD, 2010). Sería interesante disponer de evidencia en cuanto a la respuesta de este *output* innovador al impulso de la financiación pública y a la estabilidad en el marco regulatorio. Parece claro que la investigación en biocombustibles no puede ser cautiva de la intensidad y persistencia de los *shocks* en los precios de la energía que están por venir.

Desde el punto de vista de la gestión de la investigación, el Plan de Acción en Tecnología Bioenergética, preparado en 2009 por el *Major Economies Forum on Energy and Climate Change,* identifica la necesidad de impulsar la creación de centros regionales de excelencia para conectar a investigadores e industria, así como proyectos de demostración conjuntos, especialmente en biocombustibles de segunda generación. En cuanto a la financiación pública, en el primer informe de la IEA sobre la política energética de la Unión Europea (IEA, 2008) se señala que los fondos europeos destinados actualmente a la investigación en materia energética en todos los campos son insuficientes. Dicho informe muestra que el actual Séptimo Programa Marco (2007-2013) solo compromete 5.100 millones de euros en investigación en energía. En contraste con lo anterior, la UE dedica 9.050 millones de euros en tecnologías de la información y comunicaciones.

En el caso de España, los últimos datos disponibles indican que la relación de fondos públicos dedicados a actividades de I+D en energía en relación con el total de presupuesto para actividades de I+D en Ciencia y Tecnología (2007) fue un 0,13% (MEH, 2007). Por otro lado, la relación entre la cantidad total de fondos públicos aplicados a proyectos energéticos por el Departamento de Investigación dentro del Plan Nacional de I+D en el período 2004-2007 fue del 2,2% del total (1.348,93 millones de euros) (Gráfico 15), lo que lo sitúa cerca de la cola en el *ranking* de programas dentro del Plan Nacional. Esto resulta contradictorio con la importancia del sector energético industrial, especialmente el relacionado con las energías renovables, a nivel internacio-

Gráfico 14. Evolución del número de aplicaciones de patentes a la EPO en España y en Europa



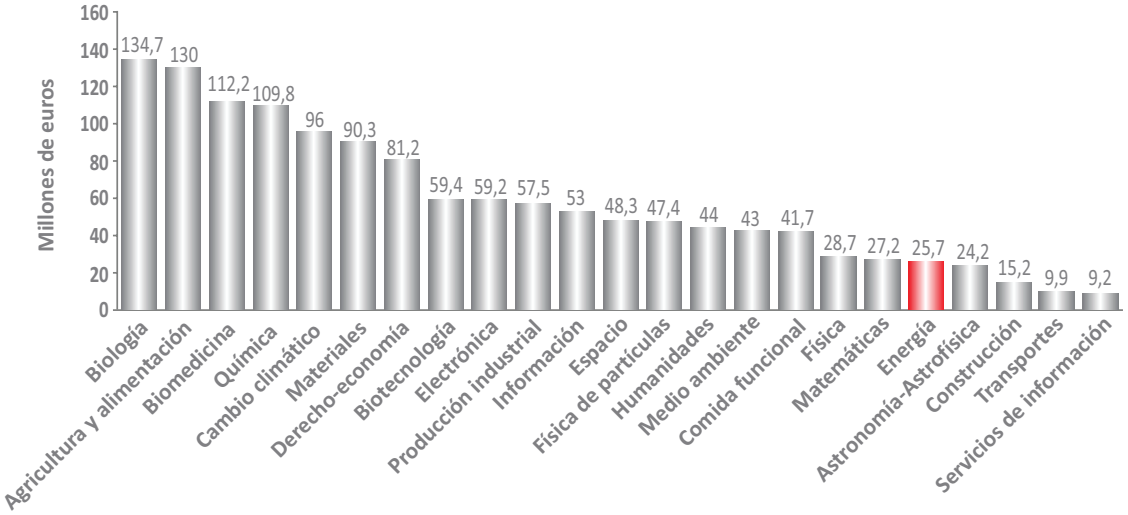


Fuente: Eurostat.

nal, como ya se ha podido ver con anterioridad, y no parece acompañar la intensidad de la iniciativa privada en bioenergía.

Las pautas que sigue el nuevo Plan Nacional 2008-2011 en biomasa y biocombustibles están recogidas dentro del Subprograma Nacional para la eficiencia energética, energías renovables y tecnologías de combustión limpia o tecnologías emergentes, organizándose en torno a la investigación y desarrollo de cultivos energéticos por un lado, y de biocombustibles líquidos por otro. Los apartados son claros pero los recursos parecen insuficientes.

Gráfico 15. Reparto de presupuesto del Plan Nacional de I+D 2004-2007 entre los distintos programas que lo componen



Fuente: Guerrero y Martínez-Duart (2009).

6
Conclusiones y recomendaciones

Los autores de este documento hemos valorado la situación actual y las oportunidades de futuro para los biocombustibles líquidos. A continuación presentamos un decálogo en forma de preguntas y respuestas que confiamos contribuya al debate en torno a la transición al menor coste posible hacia una tecnología energética sostenible baja en emisiones. La última cuestión es precisamente ¿cuál es nuestra propuesta?

Los biocombustibles como solución, o las 10 claves del futuro energético en el sector transporte

En este apartado contestamos de manera precisa a lo que nos parece son las 10 cuestiones clave de este documento. Los argumentos detallados se encuentran en las secciones que se indican en las respuestas a continuación.

1. ¿Es viable un futuro sin combustibles líquidos?

No. El *Blue Map* de la Agencia Internacional de la Energía (IEA) estima para el escenario continuista *(baseline)* que en 2050 el petróleo seguirá representando alrededor de un 90% del combustible utilizado en el sector transporte. Ese es el escenario de base en ausencia de intervenciones gubernamentales efectivas que puedan favorecer un cambio tecnológico drástico. Por tanto, pensar que podemos prescindir de los combustibles líquidos a ese horizonte parece sencillamente pura miopía. A ese horizonte, y de acuerdo con el estado actual del conocimiento, es difícil pensar que una solución eléctrica a partir de fuentes renovables pueda generalizarse para el transporte de mercancías por carretera y la navegación marítima y aérea. Por lo tanto, vamos a necesitar combustibles líquidos para el transporte, y esperamos que antes de 2050 una proporción cada vez mayor de dichos combustibles líquidos procedan de biomasa.

2. ¿Es asumible el daño ambiental que genera el sector transporte?

No. Si atribuimos el cambio climático al incremento del contenido de dióxido de carbono en la atmósfera como resultado de la quema de combustibles fósiles, aproximadamente la cuarta parte es debida al sector transporte. El *Blue Map* de la IEA estima que para que el cambio climático no progrese hasta niveles devastadores en 2050 será necesario reducir las emisiones desde los niveles actuales a, al menos, su mitad. Para ello es imprescindible, desde ya, sustituir combustible fósil por biocombustibles, y por electricidad e hidrógeno renovables, y mejorar la eficiencia energética del transporte, ambas a tasas cuantitativamente relevantes. Estas actuaciones pueden reducir las emisiones de CO_2 a un 36% de las producidas bajo el escenario continuista. El mundo se enfrenta al reto de reducir las emisiones del transporte a la vez que asimila el incremento del acceso al mismo por parte de un número cada vez mayor de sus habitantes, especialmente en las economías emergentes.

3. ¿Por qué razón promover los biocombustibles?

Porque el crecimiento en el uso de los biocombustibles, al igual que ocurre con la generación de otras fuentes de energía renovable, no está determinado por las fuerzas del mercado, y no es previsible que lo esté en un horizonte cercano. En ausencia de intervención gubernamental, la transición desde las tecnologías basadas en el carbono hacia la energía renovable solo parece inevitable a muy largo plazo.

La justificación para el apoyo a los biocombustibles proviene en primer lugar de la respuesta general al calentamiento global, pero también como vía para una mayor seguridad de suministro de combustibles y, por qué no, bajo criterios suficientemente exigentes de sostenibilidad, para una mejor gestión de los recursos agrícolas, hídricos y edáficos. La cuestión es, por tanto, si los mecanismos de apoyo que se plantean constituyen una respuesta eficiente a la amenaza indiscutible del cambio climático. En el caso de los biocombustibles tenemos la certeza de que al menos parte de la tecnología está disponible (vehículos *flex*) y funciona (el caso de Brasil). ¿Cómo replicar el éxito de la transición a vehículos *flex* de Brasil en otras partes del mundo?

4. ¿En qué situación se encuentran los biocombustibles? ¿Cuáles son las previsiones para el futuro?

La mayor parte de los vehículos admiten hoy pequeñas adiciones de etanol a la gasolina o biodiésel al gasoil, habiendo fabricantes que garantizan mezclas mayores. A

pesar de ello, las mezclas se sitúan a menudo por debajo de lo que admite la tecnología, sin que posibles costes adicionales lo justifiquen. Solo en Brasil está extendido el vehículo *flex* para el que gasolina y etanol pueden utilizarse indistintamente. Dicha circunstancia permite al usuario decidir entre los tipos de mezcla de combustible disponibles en función del precio, en lugar de enfrentarse a un dilema sobre qué tipo de vehículo adquirir.

Los biocombustibles de segunda generación se encuentran en fase precomercial debido a que la tecnología del proceso de producción necesita mejorar para hacer sus costes competitivos. Este tipo de biocombustible, por el origen de la materia prima y por las emisiones de CO_2 que genera, es la gran apuesta de futuro, especialmente en producción de etanol. A su vez, los biocombustibles de tercera generación están aún en fase de investigación y desarrollo, pero con grandes perspectivas de penetración en el mercado en el largo plazo, especialmente en el campo de las microalgas y de la modificación genética de microorganismos.

Además, los biocombustibles pueden complementarse con el vehículo eléctrico, dado que los biocombustibles garantizan una mayor autonomía de los vehículos, mientras que la electricidad garantiza una nula contaminación cuando es el motor eléctrico el que mueve los vehículos si la electricidad es de origen renovable. Esto nos puede llevar a un futuro cercano en el que vehículos híbridos enchufables *(plug-in hybrid electric vehicles)* alimenten al motor de combustión interna mediante biocombustibles, mejorando muy considerablemente el volumen de emisiones de CO_2 de este tipo de vehículos. Por otro lado, un futuro con solo vehículos eléctricos o solo vehículos alimentados por biocombustibles implicaría mucho riesgo, por lo que esta complementariedad mejoraría mucho la diversificación energética en el sector transporte.

5. ¿Qué políticas son adecuadas para la generalización del uso de los biocombustibles?

El mercado por sí solo no garantiza el desarrollo de los biocombustibles al ritmo que exige nuestra respuesta al calentamiento global. Los mecanismos de internalización de dicha externalidad basados en el mercado han de partir de la imposición a las emisiones GEI y de un sistema de comercio de emisiones *(cap & trade).* Dichos mecanismos, que son neutrales al tipo de tecnología, están insuficientemente implementados. Por el contrario, algunos gobiernos han optado por políticas de tarifas y primas a la producción, cuotas a la producción, o subvenciones a la producción o a la inversión, tanto para el desarrollo de los biocombustibles como de otras energías

renovables. Estas políticas se justifican como medios para reducir las emisiones GEI, pero a veces también por razones políticas y estratégicas, e incluso en relación con ciertas ventajas adicionales. En cualquiera de los casos lo que es imperativo es diseñar métodos para evaluar la efectividad y los costes de las políticas, así como instituciones que las supervisen, algo que parece haberse descuidado bastante hasta la fecha. En la actualidad, los estudiosos y los gestores de la política climática disponen de evidencia suficiente y de estándares metodológicos adecuados para avanzar en la evaluación de las políticas de promoción de los biocombustibles.

6. ¿Existen ventajas adicionales asociadas al desarrollo de los biocombustibles?

Sí. En primer lugar, existe un conflicto evidente en la respuesta al calentamiento global entre el Norte (rico, causante de la situación actual) y el Sur (emergente a las ventajas del crecimiento económico, especialmente China e India). Los biocombustibles representan una oportunidad para el Norte de reducir su dependencia de los productores de petróleo, y para el Sur, en sentido amplio, de rentabilizar sus cosechas, con el consiguiente beneficio en términos de salud, educación, infraestructuras y de desarrollo en general, que será tanto mayor cuanto más justo sea el reparto de los derechos de propiedad de la tierra en estos países. Por tanto, además de la cooperación frente al cambio climático no hay que renunciar a las ganancias del comercio internacional.

Además, al ser una industria con gran margen de mejora, su desarrollo y la apuesta por la I+D+i en el sector podría traducirse en nuevo conocimiento y en nuevas aplicaciones en otros sectores económico-sociales (por ejemplo, en salud o en nutrición). También podría incentivar el desarrollo a gran escala de las biorefinerías, que entrarían en competencia con las actuales refinerías que usan productos derivados del petróleo. Además de las ventajas medioambientales que esto ocasionaría, la biorefinería podría crear nuevos productos, desarrollar nuevos procesos productivos, y generar competencia frente a muchos productos que hoy solo se pueden fabricar con derivados del petróleo.

De manera indirecta, el desarrollo de los biocombustibles puede mejorar la conciencia ambiental de los agentes económicos, pudiendo favorecer la recuperación de actividades en zonas rurales, y una mayor preferencia por el reciclaje (etanol de basura orgánica), los espacios verdes y, en definitiva, la sostenibilidad.

7. ¿Cuáles son los principales inconvenientes del desarrollo de los biocombustibles?

La respuesta depende en parte del tipo de biocombustible. Si nos referimos a los de segunda generación (2G), su impacto medioambiental es muy reducido, por lo que los inconvenientes podrían estar relacionados con su rentabilidad económico-comercial en caso de que no se confirmen los resultados de eficiencia que se esperan actualmente, en fase de desarrollo.

Respecto a los biocombustibles de primera generación (1G), su desarrollo masivo podría en principio presentar algunos problemas debido a sus mayores necesidades de terrenos agrícolas y de agua. Sin embargo, la opinión más generalizada es la de que estos inconvenientes a priori quedarían ampliamente compensados por otros factores: gran reducción en la emisión de GEI, aumento en el rendimiento de las cosechas en relación con el terreno y agua utilizados, potenciación técnico-económica de las área rurales, seguridad en el suministro energético e incentivo a las inversiones necesarias para el desarrollo de los biocombustibles 2G.

Alguno de los inconvenientes medioambientales en España y en Europa proviene de la relativa dieselización del transporte. En general, sería necesario un mayor apoyo al bioetanol 1G, en relación al biodiesel 1G, debido a sus menores necesidades en cuanto a terrenos agrícolas y agua.

8. ¿Cuáles son los costes que se derivan del desarrollo de los biocombustibles?

A precios bajos del petróleo y a los niveles actuales de costes de producción, el crecimiento de los biocombustibles necesita políticas de promoción frente a los combustibles derivados del petróleo (véase el punto 5 anterior). En este sentido, la internalización de los costes de las emisiones de los vehículos que usen combustibles derivados del petróleo aliviaría la carga para los gobiernos de estas políticas de promoción. Medidas directas como primas, cuotas o subvenciones supondrían previsiblemente un coste más elevado para los gobiernos, además de no ser neutrales a la tecnología. Conviene no olvidar en todo caso que la promoción de otras alternativas renovables para el transporte también llevaría asociado costes similares. Por supuesto, a precios del petróleo por encima de 100$/barril, el esfuerzo de promoción empezaría a ser innecesario.

A veces se alude al escaso interés de los gobiernos por renunciar a la recaudación que proporcionan las gasolinas y gasóleos. Conviene no olvidar que buena parte

de dicha imposición sirve para cubrir la factura correspondiente que soportan los gobiernos y, en particular, impedir que los *shocks* en el precio del petróleo se transmitan al presupuesto del Estado del bienestar. Nada impedirá llegado el momento recaudar por el consumo de biocombustibles. Del mismo modo, el desarrollo de los biocombustibles puede dar paso a otra dependencia energética y a la exposición a *shocks* agrícolas, al menos si nos referimos a 1G. No obstante, cabe esperar que el mercado de biocombustibles sea más competitivo que el de petróleo y gas, favorezca la diversificación de los riesgos asociados a los combustibles líquidos y permita un mayor grado de independencia energética. De nuevo, la complementariedad con la electricidad de origen renovable para el transporte entra en juego.

9. ¿Cuáles son las ventajas para España de un fuerte impulso a los biocombustibles?

España tiene margen para aumentar la utilización de biocombustibles de manera inmediata, con la consiguiente mejora respecto al cumplimiento de nuestros compromisos medioambientales y a nuestra independencia energética. De hecho, el PANER 2010-2020 propone unos objetivos de utilización de biocombustibles para este período que prácticamente implican doblar su consumo. Estos objetivos facilitarían el cumplimiento de nuestros compromisos derivados del Protocolo de Kioto y de la Directiva 2009/28 de la CE, que marca unos porcentajes mínimos para 2020 sobre mitigación de GEI, energía procedente de fuentes renovables y combustibles renovables utilizados por el sector transporte. Todo ello permitiría a España posicionarse con ventaja respecto a metas a más largo plazo, como las indicadas en la hoja de ruta del *Blue Map* 2050 de la IEA.

Además, hablar de mayor independencia energética en el sector transporte, donde no actuar significa dependencia total del exterior, no parece una ventaja intrascendente asociada a impulsar los biocombustibles. Dicha independencia viene acompañada de mejoras en la estabilidad y seguridad del suministro y en nuestra balanza comercial. Y esto sin olvidar que dicho impulso viene acompañado de oportunidades para el sector agrícola doméstico, sometido a cuotas por los excedentes de cereales en ausencia de demanda bioenergética y, con ello, de más posibilidades de futuro para las zonas rurales. Se da en España por último la capacidad empresarial, puesto que Abengoa SA es líder en la UE y uno de los principales grupos del sector en EE UU, así como ciertas peculiaridades que invitan a una apuesta de futuro por microalgas e hidrógeno que no olvida los usos potenciales en la industria química.

10. ¿Cuál es nuestra propuesta?

Resumimos nuestra propuesta en **diez recomendaciones**, de carácter global cuando procede, pero sobre todo para España:

10.1 Reducción de las emisiones de CO2

Cualquier acercamiento entre la participación actual de los biocombustibles en el *mix* de carburantes y las recomendaciones *Blue Map* de la IEA podría considerarse un éxito en la respuesta global frente al cambio climático, siempre que esté a la altura de los estándares de sostenibilidad exigidos. El éxito sería aún mayor en el caso de España, donde las emisiones del transporte se acercan al 40% del total, mientras que a nivel global son un 26%. Conviene tener presente que en la actualidad, con una participación en las mezclas de gasolina y gasóleo de un 4%-5%, se evitan emisiones de CO_2 que se acercan al conjunto de las evitadas por la generación eléctrica de origen renovable. Necesitamos estar a la altura de nuestros compromisos medioambientales y reducir la demanda de combustibles fósiles, a la espera de propuestas globales respecto al lado de la oferta del problema.

10.2 Diversificación del *mix* energético

Globalmente, la dependencia del sector transporte de un reducido número de países suministradores de derivados del petróleo no es el mejor escenario desde el punto de vista de la seguridad de suministro y de la estabilidad de los precios energéticos. Un aumento de la participación de los biocombustibles hasta el 10% en 2020 reduciría sustancialmente dicha dependencia, y contribuiría a reducir el riesgo de costes asociado al *mix* de carburantes. En el caso español, más allá de la seguridad y estabilidad, la diversificación serviría para mejorar nuestro saldo de balanza comercial.

10.3 Apuesta por la sostenibilidad

Los episodios extremos de precios energéticos, en especial si van acompañados de ciertos desequilibrios financieros globales, ponen en riesgo la sostenibilidad a corto plazo. La Unión Europea debe anticiparse a dichos episodios y liderar la apuesta por la sostenibilidad, como la Directiva RED-RBSA muestra que viene haciendo. En el caso español, puesto que el consumo de bioetanol solo alcanza un 20% del consumo de biodiésel, parece conveniente y factible empezar a caminar en la dirección del resto de los países de la OCDE, donde el consumo de bioetanol duplica al de biodiésel. Por un lado, la producción de bioetanol requiere una extensión de tierra agrícola y de agua mucho menores que las del biodiésel. Por otro, el bioetanol producido en España, que proviene de los granos de cereales, aunque emite más carbono que el procedente de la caña de azúcar (caso de Brasil), es, sin embargo, capaz de evitar

alrededor de un 60%-70% en relación con la gasolina, un porcentaje de mitigación muy superior que el correspondiente al bioetanol procedente del maíz.

10.4 Transición hacia mezclas elevadas a corto plazo

Como consecuencia de las recomendaciones anteriores, es natural que nos inclinemos a favor de vehículos que admitan en el corto plazo mezclados del 10%, y a medio plazo porcentajes bastante más elevados. Se podría apostar directamente por los vehículos *flex* en un marco sin ayudas, es decir con petróleo caro, y siempre que la sostenibilidad esté garantizada. No obstante, este tipo de decisiones dependerán no solo de los fabricantes de vehículos, sino también de las distribuidoras de carburantes y del desarrollo de la red de estaciones de servicio.

10.5 Complementariedad con el vehículo eléctrico a medio plazo

En el caso de los vehículos híbridos, nuestra recomendación principal, como se deduce de este documento, es a favor de los híbridos enchufables (PHEV). En las hojas de ruta de la IEA, se espera que los PHEV entren en el mercado mucho antes que los vehículos eléctricos, debido a los pequeños cambios que implican respecto a los híbridos actuales. Evidentemente, y en relación con los puntos anteriores, lo ideal es que el carburante utilizado en los PHEV tenga la proporción más elevada posible de biocombustible.

10.6 Condiciones para el desarrollo de los biocombustibles 2G

Posiblemente, la futura consolidación de los biocombustibles dependa de la producción comercial, a precios competitivos, del bioetanol y biodiésel de segunda generación. Con este objetivo, no solo bastará con las previsibles buenas señales procedentes del mercado vía precios del petróleo. Será necesaria también la concesión de ayudas públicas a la producción que permitan la supervivencia de las plantas piloto y las plantas de demostración en biocombustibles 2G, así como desarrollar mecanismos que faciliten la financiación de la instalación de nuevas plantas que sirvan como bancos de ensayo de nuevos procesos.

10.7 Apuesta por la I+D+i

Aunque España se encuentra en condiciones bastante favorables para el desarrollo y comercialización futura de los biocombustibles 2G y 3G, sería muy recomendable ampliar los esfuerzos en el caso del bioetanol celulósico, en consonancia con los países más avanzados. En este sentido, la concesión de importantes proyectos de I+D industrial y la ayuda financiera a proyectos de plantas piloto y de demostración de bioetanol 2G es esencial. Asimismo, es necesaria una fuerte apuesta por los biocombustibles 3G, en especial por las microalgas, debido a su excelente ren-

dimiento energético, y por el hidrógeno, por sus prácticamente nulas emisiones de carbono si procede de fuentes renovables, entre las que los biocombustibles parten con ventaja. Para ello, sería muy positivo el establecimiento de un Centro Nacional de Biocombustibles de referencia que impulse las actividades de I+D+i en el área.

10.8 Cumplimiento de la normativa y coordinación

A pesar del aumento en la proporción de biocombustibles en las mezclas, que pasó del 1,9% en 2008 al 3,4% en 2009, el objetivo inicial del 5,8% para 2010 está paradójicamente en entredicho por la propuesta de RD del Ministerio de Industria (enviada a la CNE) de admitir una rebaja del objetivo en más de un punto, y recortes aún mayores para los dos próximos años. Un impulso a la coordinación entre legisladores, productores de biocombustibles, distribuidores y fabricantes de vehículos que derive en un marco regulatorio estable a medio plazo, puede ser muy positivo de cara a cumplir con los objetivos marcados por la Directiva 2009/28 de la CE, y el PANER 2010-2020, y garantizar la rentabilidad de las inversiones a realizar por parte del sector.

10.9 Condiciones para la internalización de externalidades

Es necesario avanzar en las herramientas que permiten poner un precio a las emisiones GEI procedentes de los motores de combustión interna alimentados por combustibles fósiles, ya sea a través de impuestos o estableciendo derechos de emisión a los vehículos y el comercio de dichos derechos. Además, procede informar a la opinión pública sobre la evolución del valor de dichos costes de forma que se incentive la utilización de los biocombustibles a la vez que la reducción de la demanda de carburantes fósiles. Una información objetiva: “quién emite cuánto y a qué coste” puede servir como ancla frente a mensajes a veces contradictorios que se incorporan al debate energético.

10.10 Evaluación precisa de los costes de las políticas de promoción

La necesidad de respuesta al calentamiento global y las restricciones que el entorno impone a poner un precio (suficientemente alto) a las emisiones pueden justificar medidas de promoción específicas. Es imprescindible desarrollar las herramientas que permitan la evaluación del coste de mecanismos específicos de apoyo de unas u otras alternativas renovables. En particular, es necesario explicar las ventajas que para nuestro país supone una mayor utilización de los biocombustibles, en particular desde las administraciones públicas, explicaciones que deben ir acompañadas de medidas que permitan tomar decisiones favorables al mayor uso de los biocombustibles.

Referencias

Almeida, E., J.V. Bomtempo y C. Silva (2007): *The Performance of Brazilian Biofuels: An Economic, Environmental and Social Analysis*. In: Biofuels Linking Support to Performance. OCDE. Paris.

Atsumi, S., W Higashide y J.C. Liao (2009): Nature Biotechnology 27, 1177.

Awerbuch, S. y M. Berger (2003): *Applying Portfolio Theory to EU Electricity Planning and Policy-making*. IEA/EET, Paris. Available from http://www.iea.org/textbase/papers/2003/port.pdf.

Baffes, John y Tassos Haniotis (2010): "Placing the 2006/08 Commodity price Boom into perspective". WP 5371, *Banco Mundial*.

Ball, P. (2008): Nature, doi:10.1038/news. 2008.1101

Banse, M., van Meijl, H y G. Woltjer (2008): *The Impact of First and Second Generation Biofuels on Global Agricultural Production, Trade and Land Use*. GTAP Conference Paper, June 2008. https://www.gtap.agecon.purdue.edu/resources/download/3693.pdf

Comisión Europea (2009): Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo de 23 de abril de 2009. Diario Oficial de la Unión Europea, 5 junio de 2009. p. L 140/16. EcoGrid (2008).

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), (2008): *The State Food and Agriculture—Biofuels: Prospects, Risks, and Opportunities*. Rome: FAO. Rosegrant, Mark, 2008. International Food Policy Research Institute—Biofuels and Grain Prices. http://beta.irri.org/solutions/images/publications/papers/ifpri_biofuels_grain_price

Fresco, L. (2008): *Biomasa, alimentos y sostenibilidad*. Taurus, Madrid. Gerbens-Leenesa, Winnie,1, Arjen Y. Hoekstraa, y Theo H. van der Meer. www.pnas.org_cgi_doi_10.1073_pnas.0812619106

Gil-García, G., (2008): *Energías del Siglo XXI.* Ediciones Mundi-Prensa.

Gilbert, (2008): "How to Understand High Food Prices". *Journal of Agricultural Economics*: 398-425.

Global Subsidies Initiative (2008): *Biofuels-at what cost? Government support for ethanol and biodiesel in China*.

Goldemberg, J. (1996): "The evolution of ethanol costs in Brazil". *Energy Policy*. 24, (12): 1127-1128.

GTM Research (2010): *Transitioning from 1st generation biofuels to advanced biofuels*. A White Paper from Enterprise Florida and GTM Research/Josua Kagan GTM Research.

Guerrero-Lemus R., y Martinez-Duart J. M., *Energy Policy,* 33 (2009) 4779-4786.

Guerrero-Lemus, R., y Martínez-Duart J.M. (2010): *International Journal of Hydrogen Energy,* 35: 3929-3936.

Guerrero, R., Marrero G., Martínez-Duart J. M. y Puch, L. A. (2010): *Apéndice Técnico a Biocombustibles Líquidos: situación actual y oportunidades*," mimeo.

Guesnerie, R., *et al.,* (2003): "Kyoto et l'economie de l'effet de serre", *Conseil d'Analyse Economique*, La Documentation Française, Paris.

Hodson, N. y Newman J. (2009): "A new segmentation for electric fuels". *Automotive & Assembly Practice*.

IEA (2009): *Transport, Energy and* CO_2*: Moving Towards Sustainability*

IEA Bioenergy (2009): *A Sustainable and Reliable Energy Source*. Main Report

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

IEA (2010b): *Transforming Global Markets for Clean Energy Products. Energy Efficient Equipment, Vehicles and Solar Photovoltaics*.

IEA ETP (2008): *Energy Technology Perspectives*, OCDE/IEA

IEA ETP (2010): *Energy Technology Perspectives 2010. Scenarios and Strategies to 2050*.

Kagan A.J. (2010): *Third and Fourth Generation Biofuels: Technologies, Markets and Economics through 2015*.

Larkin, S., J. Ramage y J. Scurlock (2004): Bioenergy, Ch. 4 in "Renewable Energy", Oxford University Press, Oxford.

Lichts F.O. (2004): World Ethanol & Biofuels Report.

Luenberguer, D.G. (1998): "Investment Science". Oxford University Press, Oxford.

McKinsey & Co. (2010): Energy Efficiency: A Compelling Global Resource.

Markowitz, H.M. (1952): Portfolio selection. *Journal of Finance* 7 (1): 77-91.

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, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14: 2808–2818.

Marrero, G.A., Puch L.A, and Ramos-Real F.J. (2010): "Riesgo y costes medios en la generación de electricidad: diversificación e implicaciones de política energética". *Política Exterior*, en prensa.

Mitchell, D. (2009): "A Note on Rising Food Prices". Policy Research Working Paper 4682. Washington, DC: *World Bank*.

Moselle, B., Padilla A.J., y Schmalensee R., Eds. (2010): *Electricidad Verde. Energías Renovables y Sistema Eléctrico*. Marcial Pons, Madrid.

NEF (2010): *Fact Book 2010*. New Energy Finance.

OJ (2009a): *Communication on the practical implementation of the EU biofuels and bioliquids sustainability scheme and on counting rules for biofuels* [OJ C160, p 8].

OJ (2009b): *Communication on voluntary schemes and default values in the EU biofuels and bioliquids sustainability scheme* [OJ C160, p. 1].

OJ (2009c): *Commission Decision on guidelines for the calculation of land carbón stocks for the purpose of Annex V of Directive* 2009/28/EC [OJ L151, page 19].

Organization for Economic Cooperation and Development (OECD) (2008): *Economic Assessment of Biofuel Support Policies. Directorate for Trade and Agriculture*. Paris: OECD. http://www.oecd.org/dataoecd/19/62/41007840. pdf

Pohit, S., *et al.* (2009): "International experiences of ethanol as transport fuel: Policy implications for India". *Energy policy*, 37, (11): 4540.

Preiss, P., y Blesl M. (2009): *New Energy Externalities Development for Sustainability* (NEEDS).

Renewables (2010): *Global Status Report*. REN21 (2010).

Renewable Energy Focus (2009).

Souto, J.N. (2006): *Brazil Biofuels Experience*. Ministry of Mines and Energy. Powerpoint presentation, available at www.c-caa.org/pdf/Brazil%20 Presentation.pdf

Sanz, I. (2009): *Biocombustibles: instrumento decisivo para el desarrollo sostenible*. Taurus, Madrid.

Sebastian, C. (2008): *¿Tienen los biocombustibles un papel que jugar en la lucha contra el calentamiento global?*, Escuela Focus Abengoa, mimeo.

Steen, E. J., Kang Y., Bokinsky G., Hu Z., Schirmer A., McClure A., del Cardayre S. B.y Keasling J. D. (2010): Nature 463 559.

Taheripour, F., Birur D. K., Hertel T. W., y Tyner W. E. (2008): *Biofuels and their By products: Global Economic and Environmental Implications*. GTAP Conference paper, Helsinki, June 2008.

Terceiro, J. (2008): *Economía del Cambio Climático*. Taurus, Madrid.

Twidell, J. y T. Weir (2006): *Renewable Energy Resources*. Taylor & Francis, London.

The Economic Times (2009): "India approves new policy to promote biofuels", 24 Dic.

UNEP (2009): "Towards Sustainable Production and Use of Resources: Assesing Biofuels".

U.S. Department of Energy (2010): National Algal Biofuels Technology Roadmap. Biomass Program.

Wijffels, R.H., y Barbosa M.J. (2010): *Science*, 329: 796-799.

Williams, P.J., y Laurens L.M. (2010): "Microalgae as biodiesel and biomass feedstocks", *Energy Environ. Sci*., 3: 554-590.

World Bank (2009): *Global Economic Prospects: Commodities at the Crossroads. Washington*. DC: World Bank.

World Bank (2009): Commodity Price Data. Development Prospects Group. Washington, DC: World Bank.

Wu M. *et al.* (2009): *Comparative Water Use in the Production of Ethanol and Petroleum Gasoline*, Energy Systems Division, Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois.

Wyman, C.E. (2008): "Cellulosic Ethanol: A Unique Sustainable Liquid Transportation Fuel", in Harnessing Materials for Energy, MRS Bulletin, Vol. 33: 381-383.

Documentos de debate publicados

1/2009. Una propuesta para la elección del Gobierno Europeo. Antonio Estella
2/2009. Inclusión y diversidad: ¿repensar la democracia? Wolfgang Merkel
3/2009. El Estado Dinamizador antes y después de la crisis económica. Carlos Mulas-Granados
4/2009. Programa para una política progresista: nota para el debate. Philip Pettit
5/2009. Liderando la Tercera Revolución Industrial y una nueva visión social para el mundo. Jeremy Rifkin
6/2009. Prioridades económicas de Europa, 2010-2015. André Sapir
7/2009. La crisis económica global: temas para la agenda del G-20. Joseph E. Stiglitz
8/2009. Global Progress: un paso decisivo para establecer una agenda progresista internacional para el siglo XXI. Matt Browne, Carmen de Paz, Carlos Mulas-Granados
9/2009. An EU "Fit for Purpose" in the Global Era. Una UE adaptada a la nueva era global. Loukas Tsoukalis, Olaf Cramme, Roger Liddle
10/2010. La estrategia 2020: del crecimiento y la competitividad a la prosperidad y la sostenibilidad. Antonio Estella y Maite de Sola
11/2010. La renovación liberal de la socialdemocracia. Daniel Innerarity
12/2010. La producción y el empleo en los sectores españoles durante los ciclos económicos recientes. Simón Sosvilla Rivero
13/2010. El modelo danés: un éxito en Europa. Mogens Lykketoft
14/2010. ¿Qué valor añade España a África subsahariana?: estrategia y presencia de España en la región. José Manuel Albares
15/2010. La Alianza de Civilizaciones: una agenda internacional innovadora. La dimensión local y su potencial en África. Juana López Pagán
16/2010. La crisis económica mundial en África subsahariana: consecuencias y opciones políticas para las fuerzas progresistas. Manuel de la Rocha Vázquez
17/2010. Microfinanzas, microcréditos y género en Senegal. Josefa Calero Serrano
18/2010. El debate sobre la Estrategia Española de Seguridad. Antonio Estella, Aida Torres y Alicia Cebada

Documentos de trabajo publicados

1/2009. ¿Cómo votan los españoles en las elecciones europeas? Antonio Estella y Ksenija Pavlovic
2/2009. ¿Por qué es necesario limitar las retribuciones de los ejecutivos? Recomendaciones para el caso de España. Carlos Mulas-Granados y Gustavo Nombela
3/2009. El Tratado de Lisboa. Valores progresistas, gobernanza económica y presidencia española de la Unión Europea. Daniel Sarmiento
4/2010. Por la diversidad, contra la discriminación. La igualdad de trato en España: hechos, garantías, perspectivas. Fernando Rey Martínez y David Giménez Glück (coordinadores)
5/2010. Los actuales retos y la nueva agenda de la socialdemocracia. Ludolfo Paramio, Irene Ramos Vielba, José Andrés Torres Mora e Ignacio Urquizu
6/2010. Participación ciudadana en el ámbito municipal. Reflexiones teórico-empíricas y prácticas participativas. Eva Campos
7/2010. La nueva agenda social: reforma de las políticas activas de empleo. Asunción Candela, Carlos Mulas-Granados y Gustavo Nombela

Informes publicados

Nuevas ideas para mejorar el funcionamiento de los mercados financieros y la economía mundial.
Decálogo de reformas para responder a una crisis sistémica.
(Diciembre de 2008)

La producción de los pequeños agricultores y la reducción de la pobreza.
Principios para un mecanismo de coordinación financiera (MCF) de apoyo a los pequeños agricultores.
(Enero de 2009)

Un nuevo modelo energético para España.
Recomendaciones para un futuro sostenible.
(Mayo de 2009)

Ideas para una nueva economía.
Hacia una España más sostenible en 2025.
(Enero de 2010)

Impuestos para frenar la especulación.
Propuestas para el G-20.
(Mayo de 2010)

DD
19/2010

Ricardo Guerrero, Gustavo Marrero,
José M. Martínez-Duart y Luis A. Puch

BIOCOMBUSTIBLES LÍQUIDOS: SITUACIÓN ACTUAL Y OPORTUNIDADES DE FUTURO PARA ESPAÑA

fundación ideas
para el progreso

C/ Gobelas, 31 · C.P. 28023 · Madrid
Teléfono [+34] 915 820 091 · Fax [+34] 915 820 090
info@fundacionideas.es · www.fundacionideas.es