

REVISIÓN

Ésteres metílicos de ácidos grasos como carburantes. Implicaciones económicas, ecológicas y energéticas.

Por **Carlos Gómez Herrera**

Profesor de Investigación (CSIC) jubilado y
Académico Numerario de la Real Academia Sevillana de Ciencias
Chile, 5 (Heliópolis) - 41012 SEVILLA

RESUMEN

**Ésteres metílicos de ácidos grasos como carburantes.
Implicaciones económicas, ecológicas y energéticas.**

Los cambios en la "Common Agricultural Policy" de la Unión Europea han incrementado notablemente los cultivos de colza en los terrenos "set-aside". El aceite de colza se transesterifica con metanol para obtener ésteres metílicos de ácidos grasos del aceite de sus semillas. Mezclas de estos metilésteres con gasóleo se venden en gasolineras de diferentes países europeos como cualquier otro carburante.

Este artículo de información comienza por una revisión de características básicas del gasóleo, seguida por un análisis de las propiedades físicas, la composición química y las especificaciones actuales de los metilésteres de colza. A continuación se discuten diversas implicaciones derivadas del desarrollo industrial de este biocombustible. Las mismas son económicas (producción, consumo, precios, subvenciones, exención de impuestos), ecológicas (emisiones casi nulas para el ciclo completo del dióxido de carbono, otras emisiones procedentes de la combustión, ecobalances) y energéticas (evaluación completa de los consumos energéticos para la producción, cocientes energéticos).

PALABRAS-CLAVE: Análisis económico — Balance energético — Ecología — Ésteres metílicos de aceite de colza — Información (artículo) — Propiedades físicas — Sustituto de gasóleo.

SUMMARY

Fatty acid methyl esters as diesel fuel. Economic, ecological and energetic implications.

Changes in the "Common Agricultural Policy" of the European Union have increased the rapeseed crops on "set-aside" lands remarkably. Rapeseed oils are transesterified with methanol to obtain fatty acid methyl esters. Blends of these esters with diesel oil are sold in petrol stations in different european countries like any other fuel.

This informative article starts by reviewing basic characteristics of diesel fuel, and continues with an analysis of physical properties, chemical composition and present specifications for the rapeseed methyl esters. Subsequently several implications derived from the industrial development of this biofuel are discussed. These implications are economic (production, consumption, prices, subventions, tax exemptions), ecological (nearly zero emissions for whole cycle of carbon dioxide, other exhaust emissions from combustion, ecobalances), and energetic (complete evaluation of energy expenditure for production, energetic ratios).

KEY-WORDS: Diesel fuel substitute — Ecology — Economic analysis — Energy balance — Information (paper) — Physical properties — Rapeseed oil methyl esters.

1. INTRODUCCIÓN.

Una opinión extendida desde 1973 hasta mediada la década de los años 80 ha sido que la agricultura puede

contribuir a la solución de la crisis de los carburantes. Unos diez años más tarde, para muchos países de la Unión Europea, es una realidad que los carburantes contribuyen a resolver la crisis de la agricultura.

1.1. La agroindustrialización (en inglés "agrification"), es decir, el incremento de las cosechas con destino a determinadas aplicaciones industriales, disfruta de una acogida favorable en los círculos europeos de política agraria. La defensa del medio ambiente también juega un cierto papel en la misma, aunque ciertamente no constituye el motivo principal.

Los cambios drásticos en la "Common Agricultural Policy" de la Unión Europea en 1991, con la entrada en vigor de las prescripciones de la misma sobre "set-aside lands" (terrenos utilizados anteriormente para cultivar plantas destinadas a la obtención de productos alimentarios y que ya no pueden dedicarse a este objeto) han obligado a los agricultores a buscar nuevos mercados para los productos que se cultiven en estos terrenos. En Francia la extensión de los "set-aside lands" puede estimarse en 1,5 millones de hectáreas.

Se permite, sin embargo, seguir cultivando en los "set-aside lands" las mismas plantas, si las cosechas se destinan a ciertas aplicaciones industriales.

1.2. Entre las previsiones más favorables para la agroindustrialización en Europa se encuentra la intensificación de cultivos de plantas oleaginosas cuyos aceites puedan usarse como materias primas para productos que sustituyan, total o parcialmente, a los gasóleos para motores diesel (Fuel Oil N° 2), sobre todo en vehículos de transporte.

La transesterificación de los aceites de colza con metanol tiene actualmente un desarrollo importante en diversos países europeos. Los ésteres metílicos resultantes se mezclan con gasóleo para obtener carburantes híbridos que, debidamente autorizados por algunos gobiernos europeos, ya están a la venta en estaciones de servicio y gasolineras.

Según datos de la bibliografía, la producción de estos ésteres metílicos ha pasado de unas 40.000 t (toneladas) en 1991, a unas 120.000 t en 1992, y a unas 450.000 t en 1993.

Las compañías productoras de ésteres metílicos de ácidos grasos del aceite de colza han dado a los mismos diversos nombres, tales como "Diester" y "bio-gazole" en Francia, "diesel-bi" en Francia e Italia, "bio-diesel" en Reino Unido, "ëko-diesel" en Alemania y Austria (Staat, 1993). En el presente artículo, para evitar confusiones, se designan como *metilésteres de colza*.

Las actuales intenciones de la Unión Europea a largo plazo parecen claras: conseguir que en el año 2005 un 5% de la producción total de carburantes para vehículos corresponda a productos derivados de semillas oleaginosas.

1.3. El deseo de reducir la inseguridad del abastecimiento procedente de ciertas zonas productoras de petróleo, junto con las exigencias ambientales sobre emisiones de dióxido de carbono y otros contaminantes, también contribuyen al interés mundial por el desarrollo y utilización de carburantes renovables que sean alternativas a los derivados del petróleo.

Las fuentes energéticas para la producción de electricidad se han diversificado en función de la riqueza y de las necesidades de cada país. Las fuentes de los carburantes, sobre todo de los que se utilicen en transportes, también deben llegar a diversificarse de forma similar en un plazo no lejano.

Antes de seguir adelante, interesa destacar una realidad indiscutible: "El consumo actual de combustibles líquidos formados principalmente por hidrocarburos derivados del petróleo no puede mantenerse por combustibles líquidos procedentes de la biomasa. Las extensiones de terrenos requeridas, el descenso en la producción de alimentos y, en los momentos actuales, el costo de estos nuevos combustibles hacen utópico dicho cambio".

1.4. El uso a gran escala de los *metilésteres de colza*, trae consigo, sin lugar a dudas, importantes implicaciones económicas, ecológicas y energéticas:

- a) Las elevadas subidas de precios de los derivados del petróleo, provocadas por las crisis de los años 1973 y 1979, incrementaron las investigaciones para encontrar fuentes de energías renovables y baratas que sustituyan a los gasóleos en motores diesel, calderas y otros sistemas de producción de calor. Durante los últimos años los precios del petróleo han bajado muy considerablemente, pero no hasta el extremo de que los aspectos económicos de los *metilésteres de colza* hayan perdido su interés.
- b) Las mejoras del impacto que, sobre el medio ambiente, producen los gases emitidos durante la combustión de los gasóleos constituyen actualmente el objetivo básico de un importante y amplio campo de investigación a escala mundial. A estas mejoras debe contribuir significativamente la sustitución parcial del gasóleo por carburantes derivados de la biomasa, pues teóricamente, para un ciclo completo de producción y consumo, debe resultar pequeño el incremento de dióxido de carbono en la atmósfera.
- c) La tendencia mundial a reducir el consumo de los diversos tipos de energía a niveles mínimos hace

indispensable desarrollar balances energéticos de alta fiabilidad; pues es un criterio bastante extendido suponer que la puesta a la venta en una gasolinera de un megajulio procedente de biomasa requiere el consumo de una energía superior procedente de productos petrolíferos y de otras fuentes.

1.5. La primera parte de este artículo de información describe resumidamente las características básicas del gasóleo, así como la química y la física de los *metilésteres de colza*. La segunda parte se dedica a un breve análisis de las implicaciones económicas, ecológicas y energéticas derivadas del desarrollo industrial a gran escala de los mismos.

La bibliografía está tomada preferentemente de revistas especializadas en grasas y alcanza el final de 1994.

2. CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE UN GASÓLEO.

2.1. Pulverización en el motor diesel.

El paso de un carburante líquido, desde el recipiente que lo contiene en el vehículo, hasta la mezcla de sus vapores con el aire en el interior del cilindro del motor diesel, se realiza mediante una serie de procesos de dinámica interfacial (inyección, pulverización del chorro y vaporización de las gotículas) muy complejos.

En estos procesos intervienen destacadamente la temperatura y la composición de las porciones de carburante cercanas a las superficies de las gotículas.

Según Flores Luque et al. (1987), C.F. Taylor, en su tratado "The Internal Combustion Engine in Theory and Practice", Vol. II "Combustion, Fuels, Materials, Design", establece que "cuando las características del chorro de un carburante se ajustan a las del gasóleo normal, en las condiciones que prevalecen durante su inyección en un cilindro de un motor diesel, pueden tolerarse grandes variaciones en la viscosidad, la densidad y la tensión superficial del mismo, sin efectos desfavorables para los procesos de mezclado con aire y de combustión que se producen".

Flores Luque et al. (1984) han estudiado las ecuaciones que rigen las principales características de la pulverización del chorro de carburante, tales como diámetro de glóbulos, tiempo de desintegración del chorro, amplitud de las oscilaciones del diámetro del chorro, etc. Encuentran que, en todas estas ecuaciones, la viscosidad, la densidad y la tensión superficial no aparecen aisladamente en sus términos, sino que siempre se presentan como el producto de dos de ellas, o de las tres, elevadas a distintos exponentes, es decir, en forma de "función combinada".

Hasta la fecha, las dos características que se consideran como definitorias de la capacidad de un combustible para su empleo en motores diesel son su viscosidad cinemática y su número de cetano.

2.2. Viscosidad cinemática.

Esta viscosidad ejerce una gran influencia sobre el desarrollo de la pulverización en el interior del cilindro. Si es

alta, suele producirse una inyección deficiente, con formación de glóbulos demasiado grandes y una penetración excesiva del pulverizado. Esto trae consigo combustión incompleta, deterioro de las agujas del inyector, deposición de partículas, dilución del aceite lubricante, etc.

En los Estados Unidos, los valores de la viscosidad cinemática de un "Fuel Oil N° 2", a 40 °C, se encuentran generalmente entre 1,9 mm²/s y 5,8 mm²/s.

2.3. Número de cetano.

El número de cetano de un carburante destinado a motores diesel es una estimación del retraso a su encendido, definido como el tiempo transcurrido desde que el carburante alcanza las condiciones críticas de presión y temperatura hasta que se produce su autoinflamación. Si el retraso al encendido es elevado, se acumula carburante sin quemar en el cilindro, produciéndose una combustión violenta que genera un gradiente de presiones elevado, cuya manifestación física es el fenómeno conocido como detonación. Los carburantes con mayor facilidad de ignición son los de la serie parafínica y, a continuación, los olefínicos, nafténicos y aromáticos.

Un número de cetano alto en un gasóleo indica que se controla bien su combustión, aumentándose su rendimiento. También corresponde a un arranque más fácil, sobre todo en tiempo frío, así como a unos gases de salida menos contaminantes. En Estados Unidos, el número de cetano de un "Fuel Oil N° 2" suele fijarse entre 42 y 52, con un mínimo de 40.

2.4. Otras características.

Para un gasóleo también deben tenerse en cuenta los valores de características tales como punto de inflamación, punto de fluidez, curva de destilación, contenido en azufre, residuos de carbón, cenizas, agua y sedimentos.

3. QUÍMICA Y FÍSICA DE LOS METILÉSTERES DE COLZA.

3.1. Fabricación industrial.

Actualmente esta fabricación se realiza a partir de aceite de colza bien refinado. En la transesterificación reacciona una tonelada de triacilglicerol con 100 kg de metanol, produciéndose prácticamente una tonelada de ésteres metílicos y 100 kg de glicerina. El proceso es relativamente sencillo y dura pocas horas (Murayama, 1994). Hay tecnologías que operan en discontinuo, con catalizador de KOH, a presión y temperatura ambiente. Otras operan en continuo con NaOH como catalizador, a temperatura de unos 70 °C y 1 atm de presión. Algunas compañías trabajan en continuo, con catalizadores no alcalinos, a 200 °C y 50 atm. Los metilésteres suelen presentar purezas comprendidas entre 93% y 99%. La glicerina se separa por decantación. Los metilésteres se purifican por lavado y posterior paso a través de una resina intercambiadora de iones, para eliminar las impurezas que puedan perjudicar cuando se utilizan como carburantes (Murayama, 1994).

3.2. Propiedades de los metilésteres.

La tabla siguiente contiene datos típicos de propiedades de *metilésteres de colza* y gasóleo ordinario con destino a un motor diesel (Staat y Vallet, 1994).

Propiedad	Metilésteres	Gasóleo
Densidad a 20 °C (g/ml)	0,876	0,821
Viscosidad a 20 °C (mm ² /s)	7,19	4,01
Número de cetano	49 a 54	48 a 52
Poder calorífico inferior (MJ/litro)	33,2	35,5
Temperatura de filtrabilidad (°C)	-8	-15
Punto de inflamación (°C)	100	60
Azufre (% en peso)	<0,02	0,26

De esta tabla se deduce que, según las características comparadas, los *metilésteres de colza* pueden comportarse como un carburante alternativo al gasóleo. Las densidades y los números de cetano son equiparables. Su viscosidad y su punto de inflamación son más elevados. Su poder calorífico un 15% más bajo, principalmente como consecuencia de su contenido en oxígeno (10% a 11%). Esta ligera pérdida, que viene compensada por un pequeño aumento en el consumo del motor, sólo resulta significativa si la proporción de *metilésteres de colza* en sus mezclas con gasóleo supera el 30%.

3.3. La legislación francesa, a partir de 1993, admite la mezcla de un 5% de "Diester" u otros *metilésteres de colza* en los motores diesel. Las especificaciones que deben cumplir (Mordret, 1994) son las siguientes:

Ésteres metílicos (cromatografía de gases)	> 96,5%
Monoacilglicerol	< 0,8%
Glicerina total	< 0,25%
Agua	< 200 mg/kg
Metanol libre	< 0,1%
Índice de acidez	< 1 mg de KOH por gramo
Metales alcalinos (Na, K)	< 5 mg/kg
Fósforo	< 10 mg/kg

Un proyecto de reglamentación de la Unión Europea sobre incorporación de metilésteres de colza al gasóleo considera especificaciones similares. Aunque no incluye la pureza de los ésteres, establece en 0,2% los contenidos máximos de diacil y triacilglicerol. Los contenidos de glicerina combinada y libre se fijan en 0,2% y 0,02% respectivamente. El índice de yodo máximo es 115 (Mordret, 1994).

Conviene tener presente que la distribución de los porcentajes de los ácidos grasos en los aceites de colza que se transesterifiquen puede afectar considerablemente las características de las mezclas de ésteres metílicos resultantes. Hay aceites de colza con 14% de ácido oleico; 13% de linoleico y 47% de erúxico, así como aceites de colza "sin erúxico" cuyos porcentajes de estos ácidos son 60%; 21% y 0,2% respectivamente.

3.4. Ensayos de eficacia para los metilésteres.

Se dispone de numerosos informes sobre experiencias de determinación de eficacia en los motores alimentados con metilésteres. Los tipos de motores ensayados incluyen los de inyección directa, los que tienen cámara de pre-combustión y los de dos tiempos.

Las condiciones operatorias investigadas incluyen casos donde gasóleo y metilésteres se comparan a tiempos de inyección óptimos para cada carburante. Sin embargo, la mayoría de los informes se refieren a ensayos con motores preparados para emplear gasóleo, en los cuales se comparan las eficacias de las operaciones con este carburante y con metilésteres.

El empleo de los metilésteres de colza no requiere adaptaciones o ajustes especiales en los motores diesel, pues no se obstruyen los componentes del motor, especialmente las agujas de los inyectores. En los ensayos de combustión en motores diesel han presentado comportamientos similares a los del gasóleo. Hasta la fecha, no se han registrado, a nivel experimental, problemas de funcionamiento debidos a los *metilésteres de colza*.

Interesa señalar que una simple comparación de eficacias no es suficientemente significativa para estimar las ventajas de estos metilésteres.

Su indiscutible utilidad práctica queda reflejada por la existencia, en Francia y otros países de la Unión Europea, de autobuses municipales y tractores que usan carburantes formados por mezclas de gasóleo con 5% de *metilésteres de colza*.

4. IMPLICACIONES ECONÓMICAS. PRODUCCIÓN, CONSUMO Y PRECIOS DE LOS METILÉSTERES DE COLZA.

4.1. El interés económico de las investigaciones sobre combustibles alternativos a los derivados del petróleo, incrementado continuamente durante la década de los 70 y comienzos de la de los 80 como consecuencia de las crisis petrolíferas de 1973 y 1979, ha disminuido durante los últimos años como repercusión del descenso en el coste de la energía procedente de productos petroquímicos. Un barril de petróleo, que costaba 34 dólares en 1982, tiene un precio de 15 dólares al comienzo de 1995.

4.2. Coste de los metilésteres.

Los precios de los principales aceites vegetales fluctúan considerablemente. Por término medio, los precios descienden al pasar del aceite de soja al de colza, así como al pasar de este al de palma.

Un coste típico de producción de metilésteres puede estimarse en 525 dólares por tonelada (46 centavos por litro). Según sea el valor añadido por la glicerina obtenida como subproducto, el precio de un metiléster puede variar considerablemente. Un 78% del coste suele corresponder al aceite vegetal crudo, porcentaje superior al de la materia prima del gasóleo. La distribución del resto del coste puede ser la siguiente: 15% para productos quími-

cos y servicios; 4% de intereses y depreciación; 2% de gastos generales y de mantenimiento; 1% de mano de obra.

A igualdad de poder calorífico, los metilésteres del aceite de palma, que pueden considerarse los más baratos por ser la palma el vegetal que da mayores rendimientos por hectárea, tienen un coste de producción unas 2,7 veces superior al de la producción del gasóleo, según datos citados por Murayama (1994). Esto demuestra que, sin incentivos fiscales, los biocarburantes a base de ésteres de ácidos grasos procedentes de biomasa serán totalmente incapaces de competir con el gasóleo en lo referente a precios de venta para el consumidor.

Si los impuestos sobre los *metilésteres de colza* son del orden del 15% de los que actualmente gravan al gasóleo, los precios de ambos carburantes podrían llegar a ser equiparables. En varios países europeos los *metilésteres de colza* disfrutan de ciertas medidas fiscales específicas.

4.3. Situación actual en la Unión Europea.

A continuación, se presenta un resumen basado en opiniones de expertos sobre la situación actual en diversos países europeos (Leysen, 1994) (Uzzan, 1994) (Staat, Vallet, 1994).

4.3.1. Francia.

En este país los combustibles derivados de productos agrícolas ocupan un lugar destacado. Las mejores expectativas se centran en la fabricación de *metilésteres* preparados a partir de la colza cultivada en los "set-aside lands". Un libro recientemente publicado (Jamet, 1993) se ocupa a fondo de este asunto.

Actualmente hay factorías industriales que procesan semillas de colza, cuyo aceite se destina a plantas de transesterificación con metanol. Las previsiones para la producción de metilésteres son de unas 100.000 toneladas en 1994 y superior a las 200.000 toneladas en 1995.

La mayor parte de los *metilésteres de colza* están comercializados con el nombre registrado "Diester", por la recién creada compañía "Diester-Industrie". Se venden a productoras de gasóleos tales como ELF, SHELL y TOTAL. Estas compañías preparan una mezcla "pétro-végétale" con 5% de metilésteres, de acuerdo con la legislación francesa vigente, que distribuyen a las estaciones de servicio y gasolineras. Se utilizan principalmente en autobuses urbanos y tractores (Uzzan, 1994).

Se han necesitado 12 años de experiencias para conseguir que el "Diester" se venda en las estaciones de servicio francesas.

Las opiniones no fueron favorables al principio, pero la realidad es ya muy distinta. El gobierno francés y las asociaciones de agricultores esperan conseguir, para los *metilésteres de colza*, un 5% del mercado de gasóleos, previsto en unas 800.000 t/a.

Según Staat y Vallet (1994), las autoridades francesas han suprimido para los metilésteres, cualquiera que sea su empleo, los impuestos que gravan los gasóleos.

4.3.2. Italia.

En Italia, la mayoría de los *metilésteres de colza* se destinan para acondicionamiento del aire, tanto por calefacción como por enfriamiento.

El gobierno italiano está planificando obtener de la Unión Europea ayudas para cultivar, en los "set-aside lands", girasol con destino a metilésteres. El ministerio ha firmado un acuerdo con las organizaciones de productores de semillas oleaginosas y de aceites vegetales (UNISOL, UNAPO y ASSITOL) y con las compañías poseedoras de instalaciones de transesterificación. Se pretende cultivar unas 30.000 hectáreas de girasol con destino a la producción de metilésteres.

La compañía NOVAMON, del grupo FERRUZZI, ha construido en Livorno una planta para obtener ésteres metílicos a partir de aceites de colza y de girasol, con una capacidad de 60.000 t/a.

Unas veinte ciudades italianas utilizan metilésteres en autobuses con motores "Iveco" desde finales de 1991, en un ensayo sobre 520.000 km de recorrido. La potencia de salida y los costos de estos carburantes son similares a los del gasóleo.

4.3.3. Alemania.

Argumentos de política agraria han estimulado considerablemente la investigación sobre carburantes renovables en Alemania. El interés se centra sobre los *metilésteres de colza*. Su potencial como alternativa al gasóleo se valora más favorablemente que el del bio-etanol. En ciertos lugares hay proyectos piloto prácticos, empleándose *metilésteres de colza* en taxis y autobuses.

En Alemania los metilésteres están libres de impuestos, pues se usan sin mezclar con gasóleo. Al parecer no existen planes para aplicar el "CO₂ levy", impuesto sobre la emisión de dióxido de carbono, ya exigido en varios países europeos.

Tanto el gobierno federal alemán, como los gobiernos de varios Länders, han planificado subsidios para las investigaciones sobre el aceite de colza, así como para el desarrollo de motores especiales que actúen con este aceite sin transesterificar como carburante. Entre estos se encuentra el motor "Elco", fabricado por la "Elsbett Construction Co" (Murayama, 1994).

La compañía MONTEDISON GERMANY, del grupo italiano FERRUZZI, distribuye *metilésteres de colza*, que suelen usar taxis Mercedes provistos de motor diesel. Se venden en gasolineras de Baviera y Baja Sajonia. Su precio supera en un 30% al del gasóleo corriente, a pesar de estar libres de impuestos. Una nueva planta se está construyendo en Kiel.

4.3.4. Austria.

Las discusiones sobre los carburantes de origen agrícola se concentran en la sustitución, parcial o total, del gasóleo por *metilésteres de colza*. También aquí, la agroindustrialización forma parte de la política agraria.

El gobierno austríaco estimula el empleo del aceite de colza como materia prima para carburantes mediante subsidios directos para cultivos de colza y para la construcción de plantas de transesterificación.

La unidad industrial de "Bio-energie GmbH", en Aschach, tiene 10.000 t/a de capacidad. Esta compañía coordina intereses de la industria privada y de una cooperativa agrícola. Los *metilésteres de colza* se destinan exclusivamente a usos agrícolas y están completamente libres de impuestos.

Otras tres cooperativas agrícolas disponen de una planta productora de "ëko-diesel" en Aspenhofen. Los agricultores que facilitan las semillas de colza pagan una cuota por la transesterificación del aceite y reciben una cantidad de *metilésteres de colza* dependiente del peso de semillas entregado.

4.3.5. Finlandia.

El uso de combustibles agrícolas se ha iniciado por razones de protección ambiental. Es obligatorio el uso de aceites vegetales como combustibles en silvicultura y para motores fuera-borda.

4.3.6. Suecia.

Un conjunto de ensayos ha permitido disponer de experiencia sobre el uso de aceite de colza como carburante para transportes, solo o mezclado con gasóleo. La utilización de carburantes agrícolas en transportes públicos y para tráfico de mercancías debe considerarse como un ensayo para reducir la contaminación en las ciudades.

Todos los proyectos piloto están subvencionados por el gobierno sueco. En ellos se aprecia una estrecha colaboración entre gobierno, industria agrícola y fabricantes de automóviles.

En Suecia no hay exención de tasas para los carburantes derivados de productos agrícolas, pero a los mismos no se aplica el "CO₂ levy" introducido en este país el año 1991.

4.3.7. Holanda.

El gobierno holandés duda sobre el posible futuro de los *metilésteres de colza* en los procesos de agroindustrialización. Sin embargo, se han tomado algunas iniciativas por el sector agroindustrial.

La cooperativa holandesa "CEBECO-Handelsraad" ha puesto en el mercado *metilésteres de colza*, suministrados inicialmente por la planta alemana "Connemann"; aunque una firma subsidiaria de CEBECO espera producirlos muy pronto. Hay planificada una planta con 5.000 t/a; si tiene éxito, se prevé construir una planta de 150.000 t/a en Groningen. Se pretende que los *metilésteres de colza* queden libres del impuesto sobre el petróleo.

4.3.8. Bélgica.

El gobierno belga no ha tomado una posición definida sobre el uso de los *metilésteres de colza*. La compañía "Oleofina NV", filial de "Petrofina SA", tiene una planta de transesterificación con una producción de 40.000 t/a. Se ha organizado en Mons un programa de ensayos en carretera con una mezcla de 80% de gasóleo y 20% de *metilésteres de colza*.

La compañía "Petrofina" considera la producción y comercialización de los *metilésteres de colza* como un

complemento a su negocio principal. Tiene un fuerte apoyo el criterio de concentrar el uso de los mismos en las flotas de vehículos urbanos en las ciudades que presenten problemas de contaminación, sin extenderlo sobre la totalidad del mercado.

4.3.9. Reino Unido.

El gobierno inglés ha publicado recientemente un informe que considera los *metilésteres de colza* como una de las fuentes renovables de energía menos atractivas económicamente, aunque sus ventajas medioambientales podrían darles algunos empleos. El informe establece que los *metilésteres* necesitarían un subsidio de 0,15 libras esterlinas por litro para competir con el gasóleo.

Recientemente se ha creado la "British Association for Bio Fuels and Oils", a la que pertenecen agricultores, procesadores de aceites, distribuidores de carburantes y científicos. Las revistas especializadas recogen opiniones partidarias de fomentar la producción de *metilésteres*, pues hay grandes extensiones de "set-aside lands" que podrían dedicarse al cultivo de colza.

4.3.10. Resumen para la Unión Europea.

Los agricultores de la Unión Europea están reaccionando ante la política de los "set-aside lands". Probablemente, los *metilésteres de colza* deben mantenerse a un nivel del 5% del mercado, a pesar de algunas resistencias. Actualmente se está considerando conceder un subsidio europeo que puede alcanzar un 30% del capital y de los gastos de funcionamiento de diez plantas piloto para la producción de *metilésteres de colza* con una capacidad entre 50.000 t/a y 100.000 t/a.

En la Unión Europea está elaborándose un proyecto de directiva, conocida por "Scrivener Directive", destinada a la armonización de los regímenes fiscales para los *metilésteres de colza*. La directiva sugiere un límite máximo, para el impuesto que grave los *metilésteres*, del 10% del aplicado para gasóleo. Este proyecto de directiva, que ya ha recibido informes favorables del Parlamento Europeo y del Consejo Económico y Social, espera su aprobación definitiva por el Consejo de Ministros de Finanzas. Si esta se produce, el interés económico de los *metilésteres de colza* quedará incrementado.

Un "European Economic Interest Grouping", conocido como "Euro-Bio-Diesel", agrupa actualmente entidades alemanas, francesas, griegas, irlandesas e italianas, con objeto de coordinar acciones investigadoras y económicas destinadas a desarrollar un sistema europeo para fomentar el uso de *metilésteres de colza* (Staat; Vallet, 1994).

4.3.11. Debe tenerse siempre presente que, aunque la producción europea de colza se lleve a un máximo, la cantidad de ésteres metílicos de sus ácidos grasos solo representará una fracción muy pequeña de la cantidad total de gasóleo que se consuma.

Al parecer, no existe a nivel general unanimidad a favor de los *metilésteres* para un futuro inmediato. Como ejemplo típico puede citarse el comentario de un miembro del "European Environment Bureau" sobre los beneficios derivados del uso de los biogasóleos, el cual dice textual-

mente "Why should we pay farmers to produce something completely useless like biofuels?".

Al efectuar balances económicos deben tenerse en cuenta las cantidades de subproductos, tales como la harina de colza ya desgrasada y la glicerina, que puedan recibir buena aceptación en el mercado. Por ejemplo, la glicerina está encontrando un amplio campo como materia prima para la fabricación de ésteres de poliglicerol, emulsionantes alimentarios y componentes de alimentos bajos en grasa, a los que espera un brillante porvenir (Gómez Herrera, 1994).

4.4. Situación en otros países.

4.4.1. República Checa.

El Ministerio Checo de Agricultura está planificando la sustitución de un 15% del consumo anual de gasóleo en tareas agrícolas, estimando que se necesitan unas 100.000 t/a de aceite de colza. La compañía "Milo Ohomouc" construyó recientemente una planta con capacidad para 30.000 t/a.

El Ministerio de Agricultura ha comenzado la construcción de 18 plantas más pequeñas, con capacidad total de 50.000 t/a.

4.4.2. Estados Unidos.

Bajo los auspicios de la "United Soybean Board", hay planes para esterificar aceite de soja y usarlo como "Soy-Diesel Fuel" mezclado con gasóleo en las relaciones 20/80 y 30/70.

La compañía STRATCO, de Kansas, tiene en funcionamiento una planta que produce unos 200.000 litros anuales de ésteres metílicos procedentes de la transesterificación de sebo de alta calidad.

4.5. Antes de terminar este capítulo sobre implicaciones económicas de los *metilésteres de colza*, interesa señalar que, en un artículo sobre "Economía política de los combustibles alternativos", publicado en plena crisis petrolífera (Doering, 1981), se opinaba que "si los países productores de petróleo actúan con astucia, sus precios se mantendrán justamente por debajo del coste de los combustibles alternativos, para mantenerlos bajo su dependencia energética en todo lo posible".

5. IMPLICACIONES ECOLÓGICAS.

En los últimos años, indiscutibles exigencias ecológicas han originado un importante campo de investigación cuyo objetivo es reducir los efectos sobre el medio ambiente de las emisiones de los productos residuales procedentes del funcionamiento de los motores de combustión interna, especialmente de los diesel. Las mejoras en la composición de los carburantes están recibiendo atención preferente a escala mundial, aunque también se investiga sobre perfeccionamiento en el diseño de los motores.

5.1. Según Murayama (1994), un ciclo completo de producción y consumo de una determinada fuente ener-

gética derivada en su totalidad de la biomasa vegetal debe teóricamente provocar una variación nula en el contenido de dióxido de carbono en la atmósfera. Sin embargo, este resultado óptimo no suele lograrse hasta que se haya establecido un estado de equilibrio dinámico total entre producción y combustión, equilibrio que puede existir ya en los "set-aside lands" de colza.

Un análisis del ciclo de vida de los metilésteres, desde la producción de la materia prima (semillas de colza) hasta su empleo final (combustión en los cilindros de un motor diesel) ha demostrado sus ventajas medioambientales respecto al gasóleo (Staat; Vallet, 1994).

5.2. Los *metilésteres de colza* son productos no tóxicos y biodegradables en más del 98%. Sus emisiones presentan menores porcentajes que el gasóleo de algunos contaminantes, tales como compuestos de azufre, humos, partículas, hidrocarburos sin quemar, hidrocarburos aromáticos policíclicos y acetaldehído. También suelen producirse reducciones en el ruido.

Para los óxidos de nitrógeno se encuentran porcentajes tanto superiores como inferiores. Lo mismo sucede para el monóxido de carbono, pero en muchos casos se acusa una tendencia a reducirse la emisión, atribuible en parte a la presencia de oxígeno en los metilésteres que hace más completa su combustión.

El formaldehído presenta mayores contenidos en las emisiones de los *metilésteres de colza*, sobre todo en el arranque en frío y durante el funcionamiento en vacío. También sube el porcentaje de benceno, probablemente formado a partir de compuestos insaturados procedentes de descomposición térmica. En el efecto global sobre el medio ambiente hay que contabilizar un ligero aumento en la lluvia ácida debido a ciertas operaciones agrarias. No se dispone de datos suficientes sobre la capacidad de los metilésteres para formar nieblas.

5.3. Tres estudios de tipo "Ecobalance" (Staat, 1993) han demostrado que el impacto de la cadena productora de "Diester" sobre el efecto invernadero es de tres a cinco veces inferior al del gasóleo. Estos estudios han tenido en cuenta el dióxido de carbono, el protóxido de nitrógeno y el metano. Los coeficientes del "Intergovernmental Panel on Climate Change" indican que se devuelve una unidad de "equivalente CO₂" para el efecto invernadero. Los resultados pueden mejorarse con el uso de métodos muy estrictos de cultivo, transportes, transesterificación y utilización (Jamet, 1994).

5.4. Al finalizar este capítulo sobre implicaciones ecológicas, resulta indispensable tener en cuenta que el metanol usado para transesterificar el aceite de colza es de origen fósil. Por consiguiente, parte del dióxido de carbono que la combustión de los metilésteres envía al ambiente no ha sido previamente tomado del aire mediante fotosíntesis. Este problema se resolvería transesterificando el aceite de colza con etanol procedente de biomasa, pues los etilésteres así obtenidos tienen todas sus materias primas renovables.

6. IMPLICACIONES ENERGÉTICAS.

6.1. Las "entradas" y "salidas" de energía, expresadas como gigajulios por hectárea (GJ/ha), correspondientes a la producción de aceites vegetales pueden esquematizarse (Murayama, 1994), con el balance siguiente:

Energía solar captada por la plantación: 161,1 GJ/ha. De esta energía pasan a las semillas 75,9 GJ/ha, al aceite crudo obtenido por prensado 48,5 GJ/ha y al aceite rrefinado 46,6 GJ/ha. De la energía externa aplicada, procedente en su casi totalidad de productos petrolíferos, se destinan 17 GJ/ha para los factores técnicos correspondientes a la producción agrícola, y 4,5 GJ/ha para el procesado del aceite.

Las cifras anteriores indican que el aceite vegetal obtenido puede rendir como combustible un 215% de la energía externa requerida para su obtención y procesado; pero solo un 25% de la "entrada" total de energía (solar + externa).

6.2. Una estimación bastante detallada de las "entradas" y "salidas" correspondientes a una cadena de producción de "Diester", es la propuesta por Staat y Vermeersch (1993). Se parte de un escenario referido a 1991, con un rendimiento en semillas de 3 toneladas por hectárea (t/ha). La estimación consta de dos series de cálculos.

6.2.1. 1ª serie.- Determinación de los "consumos" de energía. Todos los "consumos" se estiman en megajulios por hectárea (MJ/ha). No se tiene en cuenta la aportación de energía solar.

6.2.1.1. "Consumos" de la producción agrícola: fertilizantes (nitrógeno, fósforo, potasio), 11.240; semillas, 23; fitosanitarios, 760; combustibles, 2.646; equipamiento (materiales y maquinaria agrícolas), 795. Total = 15.464 MJ/ha.

6.2.1.2. "Consumos" de las etapas industriales, referidos a una planta de transesterificación con capacidad de 20.000 toneladas anuales similar a la ya instalada por la compañía ROBBE cerca de Compiègne:

Etapas de procesado (trituration, extracción, refinación) del aceite de colza; gas natural para calderas de vapor, 3.075; electricidad (fuerzas motrices), 1.170; hexano, 75; energía asociada a las inversiones, 150.

Etapas de transesterificación; gas natural para calderas de vapor, 2.511; electricidad (fuerzas motrices), 1.338; metanol, 4.647; energía asociada a las inversiones, 141.

Los "consumos" industriales totalizan 13.107 MJ/ha.

6.2.1.3. "Consumos" pertenecientes a los transportes del campo a la industria por 200 km de carretera (1.200 MJ/ha) y de la industria al centro de distribución de carburantes por 100 km de ferrocarril (47 MJ/ha). Totalizan 1.247 MJ/ha.

6.2.1.4. El "consumo" energético total de la cadena de producción es de 29,818 GJ/ha.

En la etapa agrícola destaca el elevado "consumo" de fertilizantes, compuestos principalmente por productos

nitrogenados. En las etapas industriales, el "consumo" de energía de la transesterificación es casi doble que el del procesado del aceite de colza, diferencia justificada casi totalmente por el "consumo" de metanol como materia prima para la transesterificación.

6.2.2. 2ª serie de cálculos.- Determinación del valor energético de los productos obtenidos. Si solo se tiene en cuenta el "Diester" obtenido, la energía de combustión en el motor puede expresarse por su poder calorífico inferior, 37,7 GJ/t.

Si se admite que una hectárea de cultivo de colza produce 1,176 t de "Diester", el valor energético correspondiente al mismo es de 44,335 GJ/ha.

6.2.3. El cociente "valor energético/contenido energético del Diester" será $44,335/29,818 = 1,49$, es decir, la energía obtenida es casi un 50% superior a la energía total de los "consumos", de las tres etapas.

6.3. Estas estimaciones se han comparado con las obtenidas empleando un escenario prospectivo para el año 2000, que tiene en cuenta la aparición de variedades híbridas de colza con un rendimiento en semillas de 4,7 t/ha. En este escenario, el valor energético del "Diester" es de 69,481 GJ/ha y su contenido energético de 32,220 GJ/ha. Su cociente es 2,16, es decir, la energía obtenida es más de dos veces superior a la energía total de los "consumos".

6.4. La estimación anterior, aunque demuestra claramente las posibilidades reales de los ésteres metílicos de los ácidos grasos de los aceites vegetales como fuente de energía, resulta insuficiente, pues no tiene en cuenta los co-productos de las etapas agrícola (pajas) e industriales (torta de colza, glicerina). Además no facilita indicaciones sobre los cocientes entre la energía del "Diester" producido y la energía fósil consumida en la producción del mismo.

6.5. En Francia se utilizan varios criterios energéticos que permiten profundizar en el impacto energético de la cadena de producción del "Diester". Entre ellos destacan los dos siguientes:

6.5.1. Criterio "R₁" - Es el cociente entre la suma de los poderes caloríficos de los productos obtenidos ("Diester" y los co-productos) y la suma de los "consumos" utilizados en su producción (semillas, fertilizantes, productos químicos, energías, etc).

El criterio "R₁" resulta valer 5,36 para el escenario de 1991 y 6,31 para el escenario prospectivo del año 2000.

El criterio "R₁" para la cadena de producción del gasóleo se ha estimado en 0,94. Su evolución con el tiempo será a la baja, sobre todo como consecuencia del aumento de la severidad de las limitaciones que vayan imponiéndose a la refinación de los petróleos.

Las estimaciones de "R₁" para la cadena de producción del "Diester" han recibido críticas. Hay opiniones de que solo se contabilicen los productos energéticos, pues las

pajas deben considerarse en términos de su potencial económico como fertilizantes y las tortas usadas en alimentación animal han de valorarse por su energía digestiva. Estas críticas están en contradicción con las metodologías petroleras, que incluyen en la contabilidad energética productos no energéticos, tales como el "white spirit" usado como disolvente, considerando su poder calorífico inferior.

6.5.2. Criterio "R₂" - Es el cociente entre la energía total del "Diester" (expresada por su poder calorífico inferior) y la totalidad de las energías fósiles consumidas por su cadena de producción.

Según Staat y Vermeersch (1993), los valores de "R₂" para los escenarios de 1991 y de 2000 son 1,9 y 2,6 respectivamente. Esto demuestra claramente que los *metilésteres de colza* rinden una cantidad de energía superior a la energía fósil consumida en su producción.

Si se admite que toda la energía directa de origen fósil se sustituye en la cadena de producción del "Diester" por electricidad obtenida con energía no fósil o procedente de la biomasa, los valores de "R₂" pasan a ser 3,2 para el escenario de 1991 y 5,1 para el del año 2000.

6.5.3. De los valores de los dos criterios anteriormente expuestos se deduce claramente que el "Diester" presenta balances energéticos de rendimiento y de capacidad de sustitución muy favorables, pues siempre superan considerablemente la unidad.

El balance energético del "Diester" mejorará sensiblemente durante los próximos años gracias a los progresos agronómicos, sobre todo por las mejoras genéticas y la disminución de los gastos de cultivo, así como a los progresos tecnológicos relacionados con la utilización de procesos continuos en instalaciones industriales de mejor economía energética.

7. CONSIDERACIONES FINALES.

Un estudio objetivo de todo lo anteriormente expuesto permite establecer que, aunque los *metilésteres de colza* solo reemplacen al gasóleo en un 5% del consumo total de carburantes para vehículos, se presentan ventajas claramente significativas en los siguientes aspectos:

- Compensación a los agricultores europeos afectados por la reglamentación de los "set-aside lands";
- Diversificación de las fuentes de carburantes;
- Reducción de emisiones al medio ambiente durante el ciclo global de cultivo, transformación y combustión de los *metilésteres de colza*;
- Reducción del consumo de energía procedente de carburantes fósiles.

Sin embargo, sería necesario conocer si las aportaciones económicas de la Unión Europea y de los gobiernos de sus Países Miembros (subvenciones, liberación de impuestos, usos en vehículos oficiales, etc.) al fomento de la producción y el consumo de *metilésteres de colza*, resul-

tarían más eficaces si las mismas se destinan a fomentar otros medios de conseguir las ventajas anteriormente citadas.

Un uso adecuado de las técnicas de "valoración del ciclo de vida", en sus componentes económicas, ecológicas y energéticas, podría responder adecuadamente al párrafo anterior.

BIBLIOGRAFÍA

- Doering, O.C. (1981).- "Economics of alternative fuels", en el workshop "Alcohol and vegetable oil as alternative fuels".- Northern Agricultural Energy Center, Peoria, Ill.
- Flores Luque, V.; Galán Soldevilla, H.; Gómez Herrera, C.; Cabrera Martín, J. (1984).- "Materias grasas naturales renovables y sus derivados como fuentes de combustibles. I. Propiedades físicas de mezclas de aceite vegetal y gasóleo agrícola". - *Grasas Aceites* **35**, 300-305.
- Flores Luque, V.; Galán Soldevilla, H.; Gómez Herrera, C. (1987).- "Estudio económico sobre la sustitución, parcial o total del gasóleo agrícola por productos de origen vegetal".- *Ing. Quim. Nov.* 133-137.
- Gómez Herrera, C. (1994).- "Aceites vegetales como alternativas al gasóleo".- *Químicos Sur*, Nº 38, 8-11.
- Jamet, J.P. (1993).- "Le Diester".- *Lés Éditions de l'Environnement*, París.
- Jamet, J.P. (1991).- "La démarche environnementale du Diester".- *OCL*. **1**, 113-114.
- Leysen, R. (1994).- "Renewable fuels in Europe".- *Lipid Technol.* **6** May/June; 54-56.
- Mordret, F. (1994).- "Controle de qualité des esters méthyliques utilisés comme biocarburants. Spécifications et méthodes d'analyse".- *OCL*. **1**, 23-24.
- Muyarama, T. (1994).- "Evaluating vegetable oils as a diesel fuel".- *INFORM* **5**, 1138-1145.
- Staat, F. (1993).- "Vegetable oil methyl esters as a diesel substitute".- *Lipid Technol.* 88-91.
- Staat, F.; Vallet, E. (1994).- "Vegetable oil methyl ester as a diesel substitute".- *Chem. Ind.* 863-865.
- Staat, F.; Vermeersch, G. (1993).- "Les esters méthyliques d'huile de colza comme carburants: Bilan énergétique".- *Rev. Fr. Corps Gras* **40**, 167-174.
- Uzzan, A. (1994).- "The French vegetable oils industry: present situation and outlook".- *Lipid Technol.* 134-139.

Recibido: Febrero 1995

Aceptado: Marzo 1995