

OPCIONES PARA LA PRODUCCIÓN Y USO DEL

BIODIÉSEL

EN EL PERÚ



OPCIONES PARA LA PRODUCCIÓN Y USO DE BIODIÉSEL EN EL PERÚ



Castro, Paula

Opciones para la producción y uso del biodiésel en el Perú

Paula Castro, Javier Coello, Liliana Castillo-Lima: Soluciones Prácticas-ITDG; 2007

176p.: il.

ISBN Nº 978-9972-47-139-0

BIOMASA/ CULTIVOS ENERGÉTICOS/ ENERGÍA DE LA BIOMASA /FUENTES DE ENERGÍA/ BIO-DIÉSEL / TECNOLOGÍAS APROPIADAS/ ACEITES Y GRASAS / METANOL / ASPECTOS JURÍDICOS/ ACEITE DIÉSEL/ COMBUSTIBLES/ TECNOLOGÍA DE LA ENERGÍA/ OPORTUNIDADES/ ESTUDIOS DE CASOS/ ENERGÍA/ PRODUCCIÓN AGRÍCOLA/ PLANTAS OLEAGINOSAS/ ALCOHOLES/ CATALIZADOR/ CONTROL DE CALIDAD/ USOS/ PERÚ

224.3/ C28

Clasificación SATIS. Descriptores OCDE

ISBN Nº 978-9972-47-136-0

Hecho el depósito legal en la Biblioteca Nacional del Perú Nº 2007-04879

Primera edición: 2007

©Soluciones Prácticas - ITDG

Razón social: Intermediate Technology Development Group, ITDG-Perú

Domicilio: Av. Jorge Chávez 275 Miraflores Lima 18, Perú. Casilla postal 18-0620

Teléfonos: 444-7055, 446-7324, 242-971

Fax: 446-6621

E-mail: info@solucionespracticas.org.pe

<http://www.solucionespracticas.org.pe>

Autores: Paula Castro, Javier Coello, Liliana Castillo

Diseño y diagramación: Jaime La Hoz, Johnny Sánchez y Jorge McGregor

Carátula: Leonardo Bonilla

Impreso por: Forma e Imagen

Impreso en el Perú, agosto del 2007

TABLA DE CONTENIDO

Tabla de contenido	3
Índice de tablas	5
Índice de figuras	6
Abreviaturas y acrónimos	7
Agradecimientos	11
Prólogo	13
Introducción	15
Capítulo 1: Nociones generales	17
1.1 El sistema energético	17
1.1.1 La energía y su creciente importancia	17
1.1.2 Distribución de la energía	19
1.1.3 Fuentes de energía	22
1.1.4 Límites del sistema energético	24
1.1.5 Alternativas	31
1.2 La biomasa	36
1.2.1 Los cultivos energéticos	38
1.3 El biodiésel	40
1.3.1 Antecedentes del biodiésel	40
Capítulo 2: Oportunidades, barreras y puntos por resolver	43
2.1 Oportunidades para la producción y uso de biodiésel	43
2.1.1 Reducción de la mayoría de emisiones contaminantes	43
2.1.2 Alta biodegradabilidad y baja toxicidad	46
2.1.3 Posible producción local	47
2.1.4 Reducción de la dependencia del petróleo importado	48
2.1.5 Ventajas técnicas	50
2.2 Posibles barreras al desarrollo del biodiésel	51
2.2.1 Incremento de las emisiones de NOx	51
2.2.2 Cambios en el uso del suelo: deforestación y pérdida de biodiversidad	52
2.3 Temas aún en debate	53
2.3.1 Sistemas de producción agrícola	53
2.3.2 Límites de la oferta de materia prima	58
2.3.3 ¿Biodiésel o aceites naturales?	59
2.3.4 Autoconsumo en zonas aisladas	60
2.4 En perspectiva	61

Capítulo 3: Situación actual del biodiésel en el mundo y en el Perú	63
3.1 El biodiésel en el mundo	63
3.1.1 ¿Cuánto y dónde?	63
3.1.2 ¿Por qué y cómo?	65
3.1.3 ¿A cuánto?	70
3.2 El biodiésel en el Perú	73
3.2.1 Materias primas: Aceites y grasas	73
3.2.2 El consumo de diésel 2	82
3.2.3 Marco legal y promoción desde el Estado	83
3.2.4 Iniciativas relacionadas con el biodiésel en el Perú	86
3.2.5 Perspectivas en el Perú	89
Capítulo 4: Producción de biodiésel: Materias primas e insumos	91
4.1 Materias primas: aceites y grasas	93
4.1.1 Fuentes de materia prima	93
4.1.2 Extracción de aceites y grasas	93
4.1.3 Composición de los aceites y grasas	98
4.1.4 Ácidos grasos	100
4.1.5 Propiedades físicoquímicas de las grasas y aceites	101
4.1.6 ¿El aceite ideal?	106
4.2 Insumos: catalizadores y alcoholes	107
4.2.1 El alcohol	107
4.2.2 El catalizador	109
Capítulo 5: Biodiésel: Procesos de producción	113
5.1 Transesterificación alcalina	113
5.1.1 Pretratamiento del aceite	115
5.1.2 Transesterificación	118
5.1.3 Postratamiento del biodiésel	120
5.1.4 Postratamiento de la glicerina	121
5.2 Transesterificación sin catalizador: metanol supercrítico	121
5.3 Craqueamiento térmico o pirólisis de las grasas	123
5.4 Tecnologías biomasa a líquido	123
5.5 Comparación de los métodos discutidos	124
Capítulo 6: Usos del biodiésel	127
6.1 Introducción	127
6.2 Control de calidad del biodiésel	127
6.3 Uso del biodiésel puro	128
6.4 Uso del biodiésel en mezclas	138
6.4.1 Cómo realizar las mezclas	139
6.4.2 Aspectos técnicos del uso de biodiésel en mezclas	140
6.5 La garantía de los vehículos cuando se utiliza biodiésel	141
Referencias	143
Anexos	155
I. Análisis de la industria de biodiésel en Colombia, Ecuador y Perú	157
II. Galería fotográfica. El proceso de producción de biodiésel	165

ÍNDICE DE TABLAS

1.1: Acceso a la electricidad según regiones del mundo (año 2002) _____	20
1.2: Emisión estimada de CO ₂ durante la producción y utilización de combustibles derivados del petróleo _____	27
1.3: Algunas tecnologías y prácticas eficientes en viviendas y edificios _____	32
2.1: Variación de las emisiones contaminantes del biodiésel respecto al diésel convencional _____	44
2.2: Balance de gases de efecto invernadero de la producción de biodiésel según diversos estudios _____	55
2.3: Balance energético de la producción de biodiésel según diferentes estudios _____	56
2.4: Contaminación de aguas y suelos generada por la producción de biodiésel _____	58
3.1: Principales productores de biodiésel en el mundo _____	64
3.2: Motivos para la regulación y sus medidas de implementación en diferentes países _____	66
3.3: Tributación federal diferenciada para el biodiésel en Brasil _____	69
3.4: Producción de vegetales oleaginosos en Perú (años 2003 y 2004) _____	73
3.5: Importación de aceites comestibles al Perú (años 2004 y 2005) _____	74
3.6: Balance de oferta y demanda de cultivos oleaginosos en el Perú (años 2001 y 2002) _____	74
3.7: Producción actual de palma aceitera en el Perú _____	75
3.8: Áreas potenciales de palma aceitera - Perú 1999 _____	76
3.9: Disponibilidad de tierras para el cultivo de palma aceitera en el Perú _____	77
4.1: Principales cultivos oleaginosos y sus características agronómicas _____	94
4.2: Oleaginosas tropicales _____	97
4.3: Ácidos grasos saturados y sus principales características _____	100
4.4: Ácidos grasos insaturados más importantes _____	101
4.5: Índices de yodo y características relacionadas de algunos aceites y grasas _____	103
4.6: Principales características fisicoquímicas de algunos aceites y grasas _____	105
4.7: Características de los aceites y producción de biodiésel _____	106
4.8: Metanol, transesterificación y razón molar _____	108
4.9: Etanol, transesterificación y razón molar _____	109
5.1: Acidez aproximada de algunas materias primas baratas _____	115
5.2: Condiciones para la transesterificación supercrítica con metanol _____	122
5.3: Características de principales procesos para la producción de biodiésel _____	125
6.1: Normas técnicas de calidad para biodiésel y diésel _____	129
6.2: Explicación de los parámetros de calidad en las normas técnicas para biodiésel _____	132
6.3: Garantías existentes para operación de vehículos diésel con biodiésel _____	142

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1:	Evolución del consumo energético anual por persona en el transcurso de la historia en países europeos_____	19
1.2:	Inequidad en el reparto de la energía (año 2004) _____	20
1.3:	Consumo de energía primaria por persona según regiones del mundo (año 2004) _____	21
1.4:	Coefficiente de electrificación en las regiones del Perú (año 2004) _____	22
1.5:	Fuentes de energía primaria en el mundo (año 2004) _____	23
1.6:	Fuentes de energía primaria en el Perú (año 2004) _____	23
1.7:	Emisiones anuales de carbono debido a la deforestación y a los combustibles desde la revolución industrial a la actualidad _____	25
1.8:	Cambios en la concentración atmosférica de CO ₂ en los últimos 10 mil años_____	26
1.9:	Emisiones de CO ₂ en el Perú provenientes del consumo energético por sectores (año 1994) _____	28
1.10:	Cubierta forestal sobre la Tierra hace 8 mil años _____	29
1.11:	Cubierta forestal primaria actual _____	29
1.12:	Intensidad energética por regiones del mundo (año 2004) _____	33
1.13:	Crecimiento promedio del abastecimiento de energías renovables (1971-2000) _____	36
2.1:	Balance de producción y consumo de diésel 2 en el Perú (años 1997 a 2004) _____	48
2.2:	Balance de producción y consumo de gasolinas en el Perú (años 1997 a 2004) _____	49
2.3:	Crecimiento del parque automotor en el Perú (años 1980 a 2004) _____	49
3.1:	Producción mundial de biodiésel 1991-2005 _____	65
3.2:	Rangos de costos para la producción de biodiésel y diésel (año 2006) _____	71
3.3:	Factores de rentabilidad para el biodiésel _____	72
3.4:	Evolución de precios del aceite vegetal, grasa animal y diésel 2 (años 1994 a 2005) _____	72
3.5:	Evolución del precio de los aceites comestibles crudos (año 2006) _____	81
3.6:	Producción y demanda actual y potencial de aceites en el Perú _____	82
3.7:	Demanda estimada del diésel 2 (años 1990 a 2014) _____	83
4.1:	Reacción de transesterificación _____	92
4.2:	Configuración química del glicerol, ácidos grasos y triglicéridos _____	99
4.3:	Reacción de oxidación de un ácido graso _____	102
5.1:	Proceso de producción de biodiésel por transesterificación alcalina _____	114

ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

INSTITUCIONES Y OTRAS ABREVIATURAS

ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (Agencia del Medio Ambiente y la Gestión de la Energía de Francia)
ASTM	American Society for Testing and Materials
CEPES	Centro Peruano de Estudios Sociales
CIDATT	Centro de Investigación y de Asesoría del Transporte Terrestre
CIF	Cost, Insurance and Freight (en comercio internacional: precio de la mercadería en el puerto de destino, incluyendo el costo del seguro marítimo y el flete de transporte)
CIFOR	Center for International Forestry Research
COCEPU	Comité Central de Palmicultores de Ucayali
CONAM	Consejo Nacional del Ambiente del Perú
CONCYTEC	Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica del Perú
CONAPAL	Confederación Nacional de Palmicultores y Empresas de Palma Aceitera del Perú
CTAR	Consejo Transitorio de Administración Regional
DEVIDA	Comisión Nacional para el Desarrollo y Vida sin Drogas del Perú
DOE	Department of Energy (Departamento de Energía de los Estados Unidos)
EPA	Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos)
EPAct	Energy Policy Act (Ley de Política Energética de los Estados Unidos)
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación)
FOB	Free on Board (en comercio internacional: precio de la mercadería puesta en el barco, sin incluir el flete)
FREDEPALMA	Federación Regional de Palma Aceitera de San Martín
G7	Grupo de los siete países más industrializados del mundo (Estados Unidos, Reino Unido, Canadá, Francia, Alemania, Italia y Japón)
GTZ	Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (Cooperación Técnica Alemana)
IDAE	Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía de España
IEA	International Energy Agency (Agencia Internacional de la Energía)
IAP	Instituto de Investigación de la Amazonía Peruana
IIPROFRUTH	Instituto Internacional de Productores de Frutas y Hortalizas

INDECOPI	Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la Protección de la Propiedad Intelectual del Perú
INEI	Instituto Nacional de Estadística e Informática del Perú
INRENA	Instituto Nacional de Recursos Naturales del Perú
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático)
ISC	Impuesto Selectivo al Consumo
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau (Banco de Desarrollo de Alemania)
MEF	Ministerio de Economía y Finanzas del Perú
MEM	Ministerio de Energía y Minas del Perú
MINAG	Ministerio de Agricultura del Perú
mín.	Mínimo
máx.	Máximo
n/d	No datado o no determinado
NIOSH	National Institute for Occupational Safety and Health (Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional de los Estados Unidos)
NREL	National Renewable Energy Laboratory (Laboratorio Nacional de Energía Renovable de los Estados Unidos)
NTP	Norma Técnica Peruana
OECD	Organisation for Economic Cooperation and Development (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico)
OLAMSA	Oleaginosas Amazónicas S.A.
OLADE	Organización Latinoamericana de Energía
ONUDD	Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito
OPEP	Organización de Países Exportadores de Petróleo
OSINERGMIN	Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería
PECSA	Peruana de Combustibles S.A.
PETROPERÚ	Petróleos del Perú S.A.
PNUD	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo
PROBIOCOM	Programa de Promoción del uso de Biocombustibles
PRODUCE	Ministerio de la Producción del Perú
PROINVERSIÓN	Agencia de Promoción de la Inversión Privada del Perú
PRODATU	Programa de Desarrollo Alternativo Tocache-Uchiza
UE	Unión Europea
UNALM	Universidad Nacional Agraria La Molina
UNDESA	United Nations Department of Economic and Social Affairs (Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de las Naciones Unidas)
UNOPS	United Nations Office for Project Services (Oficina de Servicios para Proyectos de las Naciones Unidas)
URSS	Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas
WEC	World Energy Council (Consejo Mundial de la Energía)
WRI	World Resources Institute (Instituto de Recursos Mundiales)
WRM	World Rainforest Movement (Movimiento Mundial por los Bosques Tropicales)
WWF	World Wide Fund for Nature (Fondo Mundial para la Naturaleza)

Unidades, fórmulas químicas y terminología técnica

AGL	Ácidos grasos libres
CFPP	Cold filter plugging point (punto de taponeamiento de filtros en frío)
CH ₄	Metano
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
CP	Cloud point (punto de niebla)
CPVC	Policloruro de vinilo clorado
g	Gramos
Gg	Gigagramos (un millón de gramos, equivalente a 1.000 toneladas)
Gj	Gigajoule (un millón de joules)
Gt	Gigatonelada (un millón de toneladas)
H ₂ SO ₄	Ácido sulfúrico
ha	Hectárea
HC	Hidrocarburos
HCl	Ácido clorhídrico
HF	Ácido fluorhídrico
HPA	Hidrocarburos policíclicos aromáticos
IA	Índice de acidez
IP	Índice de peróxido
IY	Índice de yodo
kg	Kilogramos
KOH	Hidróxido de potasio
kWh	Kilowatt-hora
l	Litros
meq	Miliequivalentes
mg	Miligramos
N ₂ O	Óxido nitroso
NaCl	Cloruro de sodio (sal común)
NaOH	Hidróxido de sodio
NaOMe	Metilato de sodio
NOx	Óxidos de nitrógeno
PM	Material particulado
PM10	Material particulado menor a 10 micrómetros
PVC	Policloruro de vinilo
ppm	Partes por millón
SOx	Óxidos de azufre
TM	Tonelada métrica

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. **José Luis Calle Maraví**, Jefe del Laboratorio de Energías Renovables y Decano de la Facultad de Ingeniería Agrícola de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), por apostar de manera tan decidida por las energías renovables, y en especial el biodiésel, por arriesgarse a liderar un equipo de investigación con pocos recursos pero mucha voluntad, y por demostrarnos que es posible hacer investigación útil y aplicada desde la universidad pública peruana.

Al Ing. M.Sc. **Mauricio José Gnecco Ortiz** de la empresa colombiana Tecnologías Apropriadas (APROTEC), por motivarnos a iniciar trabajos en el tema de biodiésel en el Perú, y acompañarnos desde sus queridos llanos orientales de la Orinoquia. Al maestro Dr. **Jesús Fernández González** de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos (ETSIA) de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), por inspirarnos con sus clases, escritos y consejos, ejemplo de honestidad y dedicación.

Al Dr. **Marco Aurelio Torres Mora** de la Universidad de los Llanos (UNILLANOS); y al Dr. **Electo Eduardo Silva Lora** y al Dr. **Luiz Augusto Horta Nogueira**, de la Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI); por compartir de manera tan sincera y desinteresada sus conocimientos, avances, preocupaciones y perspectivas, y permitirnos experimentar la solidaria colaboración científica y tecnológica sudamericana.

Al Dr. **Hugo Nava Cueto** y al Ing. M.Sc. **Luis Katsumi Maezono Yamashita** de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM); al Eco. M.Sc. **Gonzalo La Cruz Álvarez** de Solidaridad de Holanda; y al Soc. M.A. M.Sc. **Alfonso Carrasco Valencia** de Soluciones Prácticas – ITDG; por su decidido apoyo institucional, sin el cual no hubiese sido posible emprender estas investigaciones.

Al Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (**CONCYTEC**), en especial al Dr. **Benjamín Marticorena Castillo**, ex Presidente, y al Ing. **Alfredo Oliveros Donohue**, Director General de Medio Ambiente; a la Oficina Regional de Internationale Weiterbildung und Entwicklung gGmbH (**InWEnt**) de Lima, representada por su Coordinadora Regional, M.A. **Brigitta Villaronga Walker**; a la **Embajada de Bélgica en Lima**, representada por el Dr. **Luc De Backer**, Consejero de Cooperación al Desarrollo; a la **Cooperación Técnica Belga** (CTB), especialmente a **Jean-Jacques Bouché**, Representante Residente en Lima, y a **Véronique Gérard**, Encargada de Programas Especiales; y a la Oficina Central de **Practical Action** en Inglaterra, especialmente al Arq. M.Sc. **Theo Schilderman**, a la Dr. **Lucy Stevens** y al Ing. M.Sc. **Teodoro Sánchez Campos**; por su valioso apoyo, colaboración y auspicio con las investigaciones desarrolladas.

Al Eco. **Gastón Vizcarra Kennedy** y al Ing. **Carlos Diego Bazán de Lama**, de Candela

Perú; al Dr. **Guillermo Lira Cacho** de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI); y al Ing. **Enrique Champin Olivera** de la Universidad Alas Peruanas (UAP); por su apoyo desinteresado y valiosa participación en diversas etapas de las investigaciones realizadas.

Finalmente, al **equipo de investigación del Proyecto Biodiésel UNALM / Soluciones Prácticas - ITDG**, tanto a los que nos acompañaron en y desde el principio, como a los que se incorporaron en el camino, en especial al B.Sc. **Luis Fernando Acosta Bedoya**, la Ing. **Mirtha Rosario Nazario Ramírez**, el Ing. **Jon Cullen**, la B.Sc. **Gabriela Sologuren Pellegrini**, la B.Sc. **Susana Solange Sevilla Sevilla**, el B.Sc. **Jean Agustín Velásquez Piñas** y Tec. **Ramiro Navarro**; por su dedicación, disciplina, enorme paciencia y gran profesionalismo. Asimismo, al Ing. **José Antonio Villanueva Cáceda**, por su entusiasmo y esmero para sacar adelante el diseño y construcción de la planta piloto de producción de biodiésel. Y por último, a la Ing. **Elba Zamalloa Sedano** y a la Sra. **Raquel Montoya Chávez**, por su paciente ayuda con las delicadas finanzas.

PRÓLOGO

El biodiésel es un combustible muy discutido y muchas veces cuestionado que está destinado a crecer con muchas consideraciones y extrema cautela. En el balance ofrece muchas promesas y posibilidades en un mundo cada vez más exigente energética y ambientalmente. Este reto nos obliga a trabajar de modo más intenso, buscando espacios, insumos y procedimientos que hagan esta alternativa más viable social y económicamente. Bajo esta perspectiva, se formó el consorcio constituido por la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM) y la organización de cooperación técnica internacional Soluciones Prácticas - ITDG, buscando crear sinergias y sumar esfuerzos que permitan desarrollar investigaciones aplicadas sobre la producción de biodiésel en poblaciones aisladas. Esta alianza busca aprovechar y potenciar, tanto el liderazgo de la UNALM a nivel de investigación agropecuaria en el Perú, como de Soluciones Prácticas - ITDG en el desarrollo de tecnologías y metodologías apropiadas para sectores rurales y poblaciones pobres en diferentes partes del mundo.

Por otra parte, la posibilidad de descentralizar la producción de combustibles, el nuevo impulso a la agricultura especialmente en países en desarrollo, la creación de puestos de trabajo, y el sueño de la soberanía energética; además de su naturaleza renovable, el balance nulo de emisiones de efecto invernadero que puede tener con un manejo adecuado, y la significativa reducción de otro tipo de emisiones contaminantes durante su combustión, convierten al biodiésel en un producto acorde con el paradigma vigente del desarrollo sostenible.

Sin embargo, el biodiésel no es una solución al problema energético por sí solo. La cuestión de fondo no es sólo buscar un reemplazo para el petróleo, sino tratar de reducir el consumo energético y mejorar la eficiencia, y esto requiere un cambio de hábitos y de tecnología. El biodiésel puede ser solo una solución parcial, y quizás temporal. Además, su producción y uso aún tienen barreras sociales, ambientales, técnicas y políticas que

superar o, por lo menos clarificar. Si los sistemas de producción no son adecuados, el cultivo en gran escala de oleaginosas para producir biodiésel puede tener serios impactos sociales y ambientales. Es decir, es necesario proceder con cautela.

En el caso específico del Perú, hay un naciente – y creciente – entusiasmo con respecto a este combustible. Existen ya iniciativas privadas grandes y pequeñas, e iniciativas de la cooperación al desarrollo que ven a este producto como una posible solución a temas de pobreza rural, sustitución de cultivos ilícitos y pobreza energética. Sin embargo, el marco legal aún es poco claro, la investigación nacional sobre este combustible es limitada, y en general – tanto a nivel de productores, inversores, autoridades y futuros usuarios – existe aún bastante desconocimiento de aspectos críticos de la producción de biodiésel que pueden llevar al fracaso de estas primeras iniciativas y generar desconfianza respecto a su uso, además, no debemos olvidar que el Perú es todavía importador neto de insumos oleaginosos para consumo humano.

Este libro tiene, entonces, como principal objetivo, difundir conocimientos básicos sobre biodiésel, sus opciones, barreras y puntos por resolver, así como compartir la experiencia desarrollada por los miembros del Proyecto Biodiésel UNALM / Soluciones Prácticas - ITDG durante los últimos 4 años investigando, estudiando, promoviendo y discutiendo las posibilidades del biodiésel a pequeña escala en el Perú. De esta manera, lo que se desea es dar una mirada general a las perspectivas del biodiésel en nuestro país, en un contexto de crecimiento vertiginoso de la producción de este biocombustible a nivel mundial, además de brindar una orientación a aquellos emprendedores nacionales que deseen incursionar en esta nueva área – tanto productores agrícolas y industriales, así como usuarios o entusiastas aficionados.

Dr. José Luis Calle Maraví
Jefe del Laboratorio de Energías Renovables
Decano de la Facultad de Ingeniería Agrícola
Universidad Nacional Agraria La Molina

INTRODUCCIÓN

Este libro pretende introducir al lector interesado en una visión general sobre las opciones para la producción y uso de biodiésel en el Perú, con sus ventajas y oportunidades, pero también con los obstáculos y amenazas aún existentes.

En el Capítulo 1 intentamos hacer un breve pero conciso repaso general sobre la noción y situación del sistema energético, su creciente importancia, problemas en el reparto y distribución, las distintas fuentes, así como sus límites como sistema. Asimismo, se hace una breve revisión de los conceptos de biomasa, y una rápida mirada a los antecedentes del biodiésel.

En el Capítulo 2 profundizamos en las oportunidades, barreras y puntos por resolver respecto al biodiésel, tanto en el Perú como en el mundo. Se tratan aspectos positivos, como la reducción de la mayoría de emisiones contaminantes, su alta biodegradabilidad y baja toxicidad, la posible producción local, la reducción de la dependencia del petróleo importado, y sus ventajas técnicas. Pero también se abordan las posibles barreras para el desarrollo de este biocombustible. Y, principalmente, se revisan los temas que aún permanecen en debate y sin consensos claros, tales como el balance de gases de efecto invernadero, el balance energético, la contaminación de aguas y suelos, todos estos dependientes de los sistemas de producción que se empleen. Asimismo, se revisan los posibles límites de la oferta de materia prima; se da una primera mirada a la discusión sobre la conveniencia de utilizar biodiésel o aceites naturales de manera directa; y finalmente se considera el posible autoconsumo de este biocombustible en zonas aisladas.

En el Capítulo 3, mostramos la situación del biodiésel en el mundo: cuánto se produce, en qué zonas, en base a qué cultivos y cuáles son las motivaciones y/o maneras en que se ha promovido e impulsado su desarrollo. Igualmente, exponemos acerca del estado de la producción y uso de biodiésel en el mundo y hacemos una comparación de los posibles costos de producción. En este capítulo también hacemos una revisión sobre los avances en este tema en el Perú: materias primas potenciales, marco legal y temas pendientes, así como las iniciativas emprendidas de las que se tiene conocimiento.

En los Capítulos 4 y 5 se abordan los aspectos técnicos sobre la producción y uso de

biodiésel: materias primas e insumos, y los diferentes procesos de producción, con especial énfasis en el proceso más usado, la transesterificación alcalina, compartiendo la experiencia del equipo del Proyecto Biodiésel UNALM / Soluciones Prácticas - ITDG. Se trata también, a manera de breve presentación, los otros métodos existentes.

En el Capítulo 6 se revisan algunas particularidades sobre el uso del biodiésel, puro o en mezclas, control de calidad, aspectos técnicos de las mezclas, y el tema de garantías de los vehículos cuando se utiliza biodiésel.

Finalmente se incluye, como anexo, el artículo *Análisis de la industria de biodiésel en Colombia, Ecuador y Perú*, reporte elaborado por Francisco Toledo-Santander como parte de un proyecto en la Judge Business School de Cambridge, Inglaterra.

Este libro no pretende ser una guía terminada o manual completo sobre producción y uso de biodiésel. Intenta, más bien, ser un aporte desde la experiencia concreta de un equipo de investigación que ha venido trabajando el tema, prácticamente de manera ininterrumpida, durante 4 años consecutivos, tiempo antes, incluso, que se desatara la actual *fiebre por los biocombustibles*. Si bien en Internet es posible encontrar abundante material e información sobre biocombustibles y biodiésel, la mayor parte de esta información parte o se basa en fuentes secundarias. Este libro trata de compartir una experiencia concreta, aún en curso, y por lo mismo perfectible. Agradeceremos nos ayuden en este camino, por lo que comentarios, sugerencias, correcciones y críticas, serán bienvenidas. Es un placer compartir estos primeros cuatro años de trabajo en el tema, y esperamos en un futuro, volver a hacerlo con más y mayores avances, experiencia y resultados.

Ing. M.Sc. Paula Castro Pareja
Ing. Javier Coello Guevara
Ing. Liliana Castillo Sánchez

NOCIONES GENERALES

1.1 EL SISTEMA ENERGÉTICO

1.1.1 LA ENERGÍA Y SU CRECIENTE IMPORTANCIA

La energía es, básicamente, la *capacidad para realizar trabajo*. En un sentido amplio esto significa la capacidad de obrar, transformar y poner en movimiento¹. Existe energía debido a la posición, el movimiento, la composición química, la masa, la temperatura y otras propiedades de la materia. Está en todas partes, y no se puede destruir, sólo transformar.

Económicamente, la energía es un *recurso natural*. Como tal, es un bien escaso, con límites: A pesar de que la energía está en todas partes, en todos los cuerpos, sólo constituye un recurso cuando su aprovechamiento es viable con la tecnología actual. Sin embargo, es un recurso esencial: es el recurso que está presente en el manejo de todos los demás; atraviesa, recorre y permite el funcionamiento de cualquier sistema material organizado. No existe ningún proceso o actividad, natural o artificial, que no suponga un intercambio de energía. Consumimos energía entonces durante todo el tiempo: al respirar, comer, andar, hablar, transportarnos... al vivir.

La energía es por lo tanto *uno de los fundamentos de la vida* – no sólo de la humana, sino de cualquier ser. Las plantas aprovechan directamente la energía luminosa del sol, y los animales toman la energía contenida en sus alimentos. El hombre, además de consumir alimentos como su fuente básica de energía, aprendió hace miles de años, poco a poco, a hacer uso de otras fuentes de energía para satisfacer otras necesidades y mejorar su calidad de vida.

¹ Físicamente, el trabajo se refiere únicamente a la generación de movimiento. Pero también, existen tipos de energía (por ejemplo el calor cuando está disperso) que no son capaces de ser aprovechadas para generar un movimiento, pero que sin embargo pueden causar otras transformaciones, como las reacciones químicas, o los cambios de estado (sólido, líquido y gaseoso).

Hace alrededor de 400 mil años, el hombre empezó a utilizar conscientemente el fuego como fuente de energía. Lo capturaba de algún incendio natural causado por el rayo, y lo mantenía en sus cavernas añadiéndole trozos de madera constantemente. El fuego tenía la función de calentar las cavernas donde vivía, cocer partes de los animales que no eran digeribles y endurecer las puntas de sus lanzas para facilitar la caza (Mohedano, 2002). Las civilizaciones antiguas aprendieron a utilizar la leña para producir fuego, inventaron los hornos en los que se podía concentrar el calor del fuego, y descubrieron el carbón vegetal. Estos avances les permitieron, primero, producir alfarería (y conservar mejor sus alimentos), y luego, trabajar el cobre y el hierro (para mejorar sus armas y herramientas).

En la época preindustrial, la segunda fuente de energía en importancia (luego de la leña) la constituían los esclavos, y también se utilizaba la tracción animal, la energía del viento en la navegación y la del agua en los molinos hidráulicos. Puede decirse que hasta esta época, todas las fuentes de energía empleadas por el hombre fueron renovables. No obstante, su utilización aún así causaba serios impactos ambientales y sociales, como la depredación de los bosques, la muerte de miles de hombres sometidos a la esclavitud y la contaminación del aire en los centros urbanos.

Fue con la industrialización que se generalizó el uso del carbón mineral y se lograron mayores eficiencias energéticas con el desarrollo de la máquina a vapor. Esta permitió significativos avances en la minería, la industria siderúrgica y la industria textil, así como en el transporte: primero se creó el ferrocarril y finalmente el automóvil. La tracción animal fue poco a poco relegada a un segundo plano.

El petróleo tiene mayor densidad energética que el carbón, es más fácil de transportar y produce menos residuos de combustión. Es también más fácil de extraer. Por eso, su consumo se impuso a partir de la Segunda Guerra Mundial, dando origen a la llamada *era del petróleo* (Colmenar y Castro, n/d).

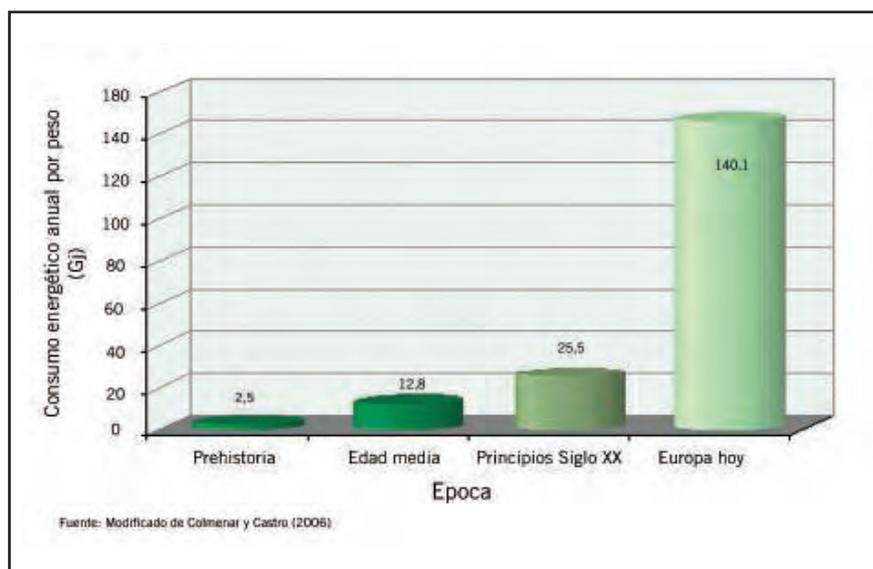
Con el descubrimiento y uso de la electricidad, las necesidades humanas – y el consumo energético – han ido en aumento en todos los campos: iluminación, telecomunicaciones e información, actividades domésticas, industria, comercio, etc. Para satisfacer estos requerimientos se utilizan no sólo el carbón y el petróleo, sino también el gas, la energía nuclear, hidráulica, del viento, del sol y de la biomasa; entre otras. Como se puede apreciar en la Figura 1.1, el consumo anual de energía por persona ha ido creciendo exponencialmente con el transcurso de la historia, de modo que ahora una persona en un país industrializado consume más de 50 veces la energía que utilizaba en la prehistoria.

La demanda mundial de energía sigue creciendo incluso a pesar de que la eficiencia de muchos vehículos, aparatos eléctricos y procesos industriales ha mejorado. La responsabilidad por este crecimiento recae tanto en los países industrializados como en los países en desarrollo (IEA, 2005).

Los países industrializados no han reducido su demanda energética a pesar de las mejoras en eficiencia energética, debido a que los mejores estándares de vida resultan en mayores expectativas de los consumidores. Así, por ejemplo, aunque se mejoró la eficiencia de los

vehículos, los consumidores eligieron comprar vehículos más grandes y viajar mayores distancias. En los países en desarrollo, tanto los programas de electrificación rural y urbana, como el desarrollo de sistemas de transporte y la industrialización, han derivado en un fuerte incremento en la demanda energética, muchas veces mayor al crecimiento poblacional (IEA, 2005).

Figura 1.1: Evolución del consumo energético anual por persona en el transcurso de la historia en países europeos



De esta manera, a pesar de que el aporte energético básico que requiere una persona es de 2.600 kilocalorías por día o cerca de 4 GJ por año (para el caso de un hombre joven de 25 años y 70 kilos de peso con una actividad moderada), el consumo mundial de energía primaria por habitante es de aproximadamente 73 GJ por año, es decir, 18 veces mayor a lo requerido estrictamente para sobrevivir (Colmenar y Castro, n/d; IEA, 2006a).

1.1.2 DISTRIBUCIÓN DE LA ENERGÍA

Este espectacular crecimiento en el consumo de energía no ha sido parejo en todo el mundo. Más de la cuarta parte de la humanidad aún no tiene acceso a la electricidad, es decir más de 1,6 billones de personas (IEA, 2004). Y de toda esta población sin electricidad, el 99,4% se encuentra en países en desarrollo y el 80% en zonas rurales (ver Tabla 1.1).

Tabla 1.1: Acceso a la electricidad según regiones del mundo (año 2002)

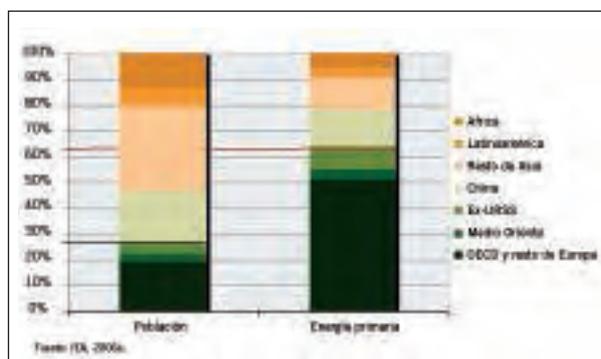
Región	Población sin electricidad (millones)	Población con electricidad (millones)	Tasa de electrificación(%)
Países en desarrollo (total)	1.614	3.071	65,5
África	535	295	35,5
Asia en desarrollo	1.019	2.236	68,7
Latinoamérica	46	382	89,3
Medio Oriente	14	158	91,9
Economías en transición y OECD	7	1.484	99,5
MUNDO	1.621	4.555	73,8

Fuente: IEA (2004)

Además, alrededor de 2,4 billones de personas (52% de la población de países en desarrollo) dependen aún de combustibles de biomasa tradicional (leña, estiércol, carbón vegetal y residuos de cosechas) para cocinar sus alimentos y calentarse (IEA, 2002; IEA, 2004).

Pero no sólo los niveles de acceso a energía de calidad² son desiguales. También en el nivel de consumo de energía primaria³ hay una gran inequidad: en los países industrializados⁴ habita solamente el 26,5% de la población mundial, pero se consume casi el 64% de la energía primaria; mientras que el 73,5% restante de la población consume sólo el 36% de la energía (Figura 1.2). Esto se refleja también en el nivel de consumo de energía por persona: un habitante de Norteamérica consume en promedio 13 veces más energía por año que una persona en Perú (Figura 1.3) (IEA, 2006a).

Figura 1.2: Inequidad en el reparto de la energía (año 2004)

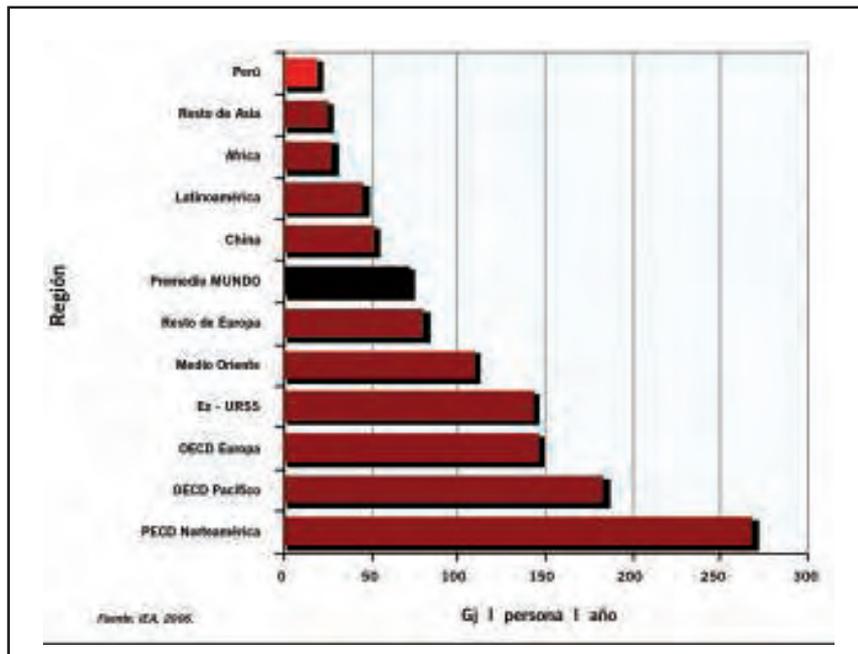


² El término energía de calidad alude a formas modernas de energía, tales como la electricidad y combustibles líquidos y gaseosos.

³ El término energía primaria se refiere a la forma inicial de la energía, luego de su producción o importación desde otro país. Parte de esta energía es luego transformada en refinerías, plantas eléctricas y plantas de calor para dar lugar a la energía secundaria o final, que es luego transportada y distribuida a los consumidores finales. En estos procesos se pierde energía, y por eso la energía primaria producida es diferente de la energía final consumida en un país (IEA, 2004).

⁴ Considerando los países de la OECD, Medio Oriente, el resto de Europa y la ex-URSS.

Figura 1.3: Consumo de energía primaria por persona según regiones del mundo (año 2004)



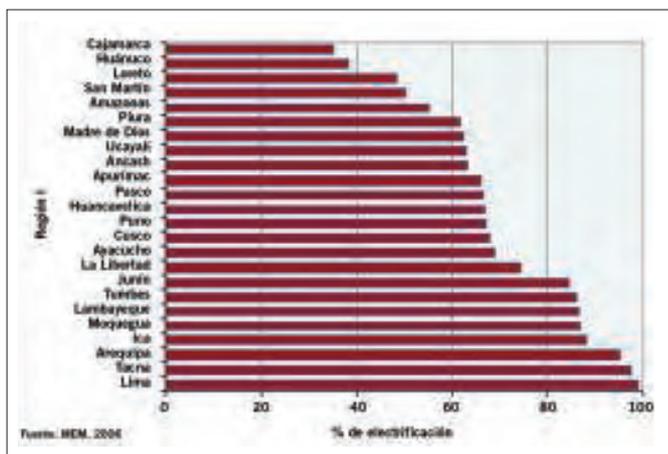
En el Perú el acceso a la energía también es desigual, tanto por región, como por tipo de consumo. A pesar de que el uso de la leña, bosta y yareta (lo que podría denominarse *biomasa tradicional*) sólo representa un 15% de la energía primaria consumida en el país⁵ (o un 17% de la energía final consumida), en el sector residencial y comercial estas fuentes representan más del 57% de la energía consumida (MEM, 2006). Es decir, aún más de la mitad de la energía consumida por los hogares y comercios del país proviene de la biomasa tradicional. Este consumo, además de los problemas de deforestación que suele generar, también causa graves problemas en la población, principalmente referidos a enfermedades respiratorias.

El uso de biomasa tradicional (de muy baja eficiencia, cercana al 10%) está relacionado muy de cerca con el coeficiente de electrificación⁶ en las regiones. En Cajamarca, Huánuco y Loreto, menos del 50% de viviendas cuentan con electricidad, y en otros 13 departamentos el coeficiente de electrificación es menor al 75% (MEM, 2005b) (ver Figura 1.4).

⁵ Cabe precisar que esta energía incluye la producida en el país y la importada, que es principalmente petróleo.

⁶ El coeficiente de electrificación indica la proporción de habitantes o viviendas que reciben servicio de energía eléctrica en una determinada área (MEM, 2005 b).

Figura 1.4: Coeficiente de electrificación en las regiones del Perú (año 2004)



1.1.3 FUENTES DE ENERGÍA

Además del crecimiento en la demanda energética y la desigualdad en su repartición, hay un tercer elemento que caracteriza al sistema energético actual: las fuentes que proveen la energía.

El sol es la fuente primaria de energía que mantiene la vida en nuestro planeta, gracias al proceso de fotosíntesis por el cual las plantas pueden crecer, pero además da origen a las principales fuentes energéticas de carácter renovable y no renovable: la biomasa, el viento y los cursos de agua, así como – en muy largo plazo – el carbón, el petróleo y el gas natural.

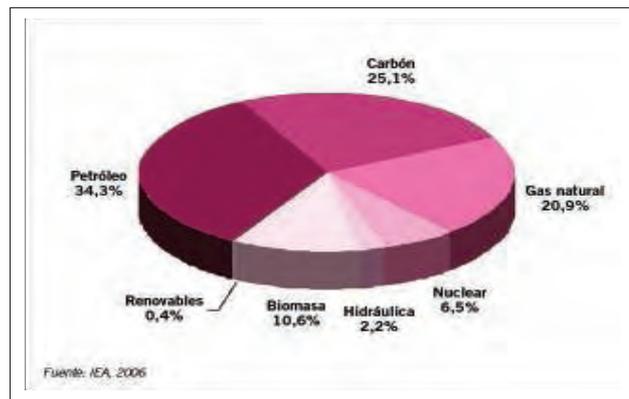
Hasta el siglo XIX, el hombre fue capaz de satisfacer sus necesidades con energías renovables. Recién en los últimos cien años, con la industrialización, se ha requerido usar carbón, luego petróleo – desde la Segunda Guerra Mundial – y en menor medida gas natural y energía nuclear.

Actualmente el sistema energético está basado en su mayor parte en el empleo de combustibles fósiles y el consumo de leña. Esto ha traído como consecuencia la peligrosa degradación ambiental del planeta, debido a las emisiones de CO₂ a la atmósfera que están contribuyendo al cambio climático global, a las emisiones de otros gases contaminantes en las ciudades que afectan a la salud de las poblaciones y a la deforestación causada por la demanda de leña.

El conjunto de combustibles fósiles – petróleo, carbón y gas natural – provee el 80% de la energía primaria total consumida en el mundo (IEA, 2006a), y de ellos el petróleo

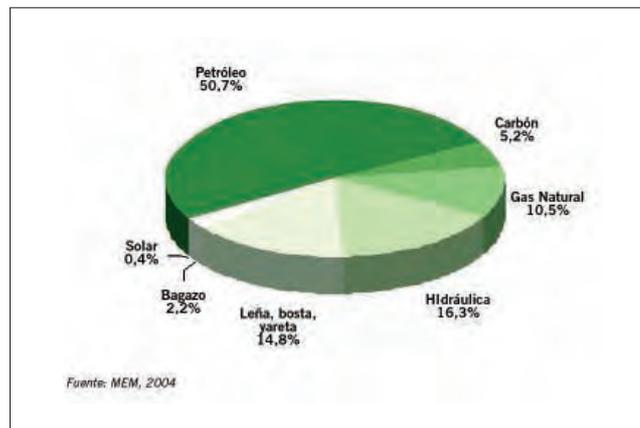
sigue siendo el principal, ya que aporta el 34% del total de la energía. La biomasa tradicional – leña, residuos de cosecha, estiércol; entre otros – es la cuarta fuente en importancia, con un 10,6% de la energía primaria consumida total (ver Figura 1.5).

Figura 1.5: Fuentes de energía primaria en el mundo (año 2004)



En el Perú la distribución de fuentes de energía es parecida: los combustibles fósiles representan el 66% de nuestras fuentes primarias de energía, y la biomasa tradicional el 15% (17% si se considera además el bagazo, utilizado principalmente en la industria azucarera) (MEM, 2006). En nuestro país, la hidroenergía representa una fuente importante para la producción de electricidad (16% de la energía primaria total), debido al potencial hidroeléctrico existente gracias a la cordillera de los Andes (Figura 1.6).

Figura 1.6: Fuentes de energía primaria en el Perú (año 2004)



1.1.4 LÍMITES DEL SISTEMA ENERGÉTICO

El mantenimiento del sistema energético descrito – con una demanda creciente, con la desigualdad entre países industrializados y en desarrollo y entre zonas rurales y urbanas, y con la fuerte dependencia en los combustibles fósiles – no es sostenible por los impactos y problemas de tipo social, ambiental, económico y geopolítico que genera, a saber:

PROBLEMÁTICA SOCIAL

Más de 2 billones de personas en los países en desarrollo aún no cuentan con servicios energéticos adecuados, acceso que es fundamental para las actividades del hombre, estándares de vida apropiados, el desarrollo y el crecimiento económico (PNUD, UNDESA y WEC, 2004).

Los servicios energéticos – los servicios que la energía puede proveer, como iluminación, calefacción, cocción de alimentos, transporte motorizado, bombeo de agua, molienda, etc., – son esenciales para el desarrollo social y económico. Los servicios energéticos tienen un efecto multiplicador sobre los servicios de salud, educación, transporte, telecomunicaciones, agua y alcantarillado, así como sobre las inversiones y la productividad de actividades generadoras de ingresos, como la agricultura, la industria y el sector terciario. Por lo tanto, un mayor acceso a ellos es fundamental para lograr los Objetivos de Desarrollo del Milenio (Modi *et al.*, 2006).

Mujeres y niños de las zonas rurales tienen que dedicar hasta 7 horas al día recolectando leña, lo cual reduce su tiempo libre para otras actividades como el cuidado de los niños más pequeños, la educación y la generación de ingresos. Alrededor de 1,6 millones de mujeres y niños mueren al año debido a la contaminación del aire producida por los fogones para cocinar (PNUD, UNDESA y WEC, 2004). Combustibles más limpios, cocinas más eficientes y mejor ventilación pueden disminuir las tasas de mortalidad infantil, mejorar la salud materna, reducir el tiempo necesario para conseguir leña e incrementar el tiempo disponible para educación y trabajo remunerado. Asimismo, pueden ayudar a reducir la presión sobre los ecosistemas (Modi *et al.*, 2006).

El acceso a la electricidad mejora los servicios sanitarios, de salud y educación, permitiendo la mejor esterilización de equipos, la purificación del agua y su abastecimiento más seguro, la refrigeración de medicinas. Además, permite el uso de máquinas para mejorar las actividades productivas, por ejemplo, mediante el bombeo de agua para la agricultura, el procesamiento de los alimentos y el desarrollo de industrias ligeras. Por el contrario, la falta de electricidad en las zonas rurales constituye una desmotivación para que personas más educadas – profesores, doctores, enfermeras, extensionistas – vivan allí. La disponibilidad de energía moderna⁷ también facilita el acceso a la información, recurso vital en todos los sectores productivos, y reduce los costos de transacción y transporte. Por todo esto, la energía es una de las bases para el crecimiento y el desarrollo (Modi *et al.*, 2006).

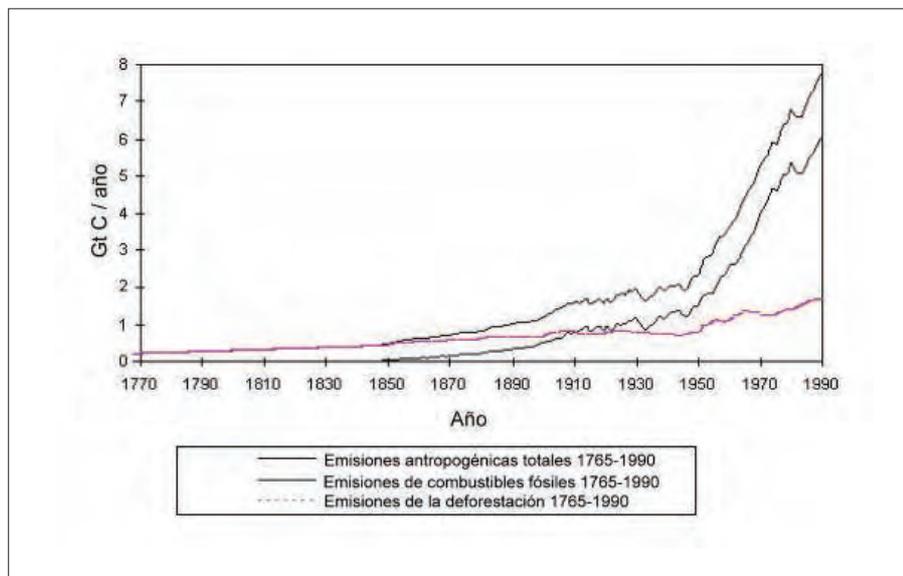
⁷ El término energía moderna se refiere principalmente a la electricidad y combustibles líquidos y gaseosos.

CAMBIO CLIMÁTICO

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático usa el término cambio climático sólo para referirse al *cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial* (al cambio producido constantemente por causas naturales lo denomina *variabilidad natural del clima*). En el actual modelo energético, que es un sistema abierto, el hombre adiciona a la atmósfera elevadas cantidades de dióxido de carbono (CO_2) a un ritmo desproporcionado con la capacidad de la naturaleza para reciclar dicho compuesto.

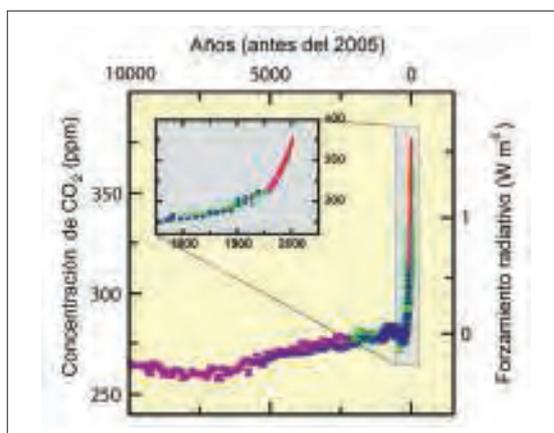
Este CO_2 de origen antropogénico se debe básicamente al cambio en el uso del suelo (principalmente por la deforestación causada por el creciente uso de leña y carbón vegetal especialmente desde la revolución industrial) y a las emisiones de los combustibles fósiles – éstas últimas las principales desde los años veinte en que se da la primera guerra mundial, el desarrollo de los automóviles y aviones y el descubrimiento del petróleo barato (ver Figura 1.7 y Figura 1.8). En el Perú, sin embargo, de los más de 30 mil Gg de CO_2 que se emitirían anualmente (CONAM, 2001), la mayor parte, 55%, se debería a cambios en el uso del suelo – principalmente la conversión de bosques y pastizales en tierra de cultivo – mientras que el 45% restante se atribuiría al consumo de energía fósil – especialmente la industria, transporte, comercio, uso doméstico, agroindustria, minería, etc.

Figura 1.7: Emisiones anuales de carbono debido a la deforestación y a los combustibles desde la revolución industrial a la actualidad



Fuente: CSIRO (Citado por Hare Bill en Fossilfuels and climate protection: the carbon logic).

Figura 1.8: Cambios en la concentración atmosférica de CO₂ en los últimos 10 mil años



Fuente: IPCC, 2007.

A nivel global las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero – principalmente dióxido de carbono (CO₂)⁸ proveniente de los procesos de combustión – están alterando la composición de la atmósfera. La concentración atmosférica de CO₂ ha aumentado de 280 ppm (partes por millón) en 1750 hasta 379 ppm en el 2005, y esta concentración actual es la mayor en los últimos 650 mil años. Se ha demostrado que este incremento se debe principalmente a la oxidación de carbono orgánico – producto de la combustión de combustibles fósiles y la deforestación (IPCC, 2007). En el Perú el CO₂ también es el principal gas de efecto invernadero, con casi el 69% del total de emisiones, seguido por el metano (CH₄) con alrededor del 17% y el óxido nitroso (N₂O) con poco más del 14% (CONAM, 2001).

Estos cambios en la composición de la atmósfera (aumento en la concentración de CO₂ y otros *gases de efecto invernadero*) están incrementando el efecto invernadero⁹ (por un aumento en la retención de la radiación terrestre) y están originando el calentamiento de la atmósfera y de la superficie terrestre, lo que conocemos como *calentamiento global*, una de las principales expresiones del mencionado cambio climático.

Según el IPCC (2007) y el Institute for Plasma Physics Rijnhuizen (2005) los principales efectos del cambio climático registrados hasta la actualidad son:

- ▶ En el último siglo la temperatura media¹⁰ ha subido 0,74 grados centígrados.
- ▶ En ese mismo periodo el nivel del mar se ha elevado entre 12 y 22 centímetros.

⁸ El CO₂ representa el 60% de todos los cambios en las concentraciones de gases invernadero en la atmósfera (IPCC, 2001).

⁹ El efecto invernadero es un fenómeno absolutamente natural, y su fundamento es bastante conocido: la atmósfera es prácticamente transparente a la radiación de onda corta emitida por el Sol, pero la radiación de onda larga que rebota de la superficie de la Tierra es parcialmente retenida por algunos gases presentes en la atmósfera, principalmente el dióxido de carbono y en menor medida el vapor de agua, el metano, el óxido nitroso y otros gases. Este fenómeno es el que mantiene la temperatura de la Tierra en un valor medio global de 15°C en lugar de los -18°C que le corresponderían por su distancia al sol si estos gases no estuvieran en la atmósfera.

¹⁰ Referida al promedio de las temperaturas del aire cerca a la superficie terrestre y la superficie del mar.

- ▶ La extensión de los glaciares y masas de hielo en las montañas ha decrecido en todo el mundo.
- ▶ El hielo en el Ártico, la Antártida y Groenlandia también está decreciendo en extensión y grosor y contribuyendo a la elevación del nivel del mar.
- ▶ Se están produciendo lluvias más fuertes y extremas en latitudes medias y altas del hemisferio norte.
- ▶ Se ha observado mayor sequedad en el Sahel¹¹, el Mediterráneo, el sur de África y partes del sur de Asia; y sequías más intensas y largas en extensas zonas desde la década de los años 70, especialmente en la región tropical y subtropical.
- ▶ De los últimos 12 años (ente 1995-2006), 11 de ellos se encuentran entre los 12 años más calurosos, desde que se toman registros continuos de temperatura (1850).
- ▶ Durante los últimos 50 años se han observado cambios en las temperaturas extremas. Los días y noches fríos están siendo menos frecuentes, mientras que los días y noches calientes y las olas de calor se han vuelto más frecuentes.
- ▶ Se ha observado un incremento en la actividad de ciclones tropicales intensos en el Atlántico Norte.

Un cambio climático aún más significativo va a resultar si no se reducen las emisiones de CO₂ del sistema energético (PNUD, UNDESA y WEC, 2004). Se calcula que para el año 2100 la temperatura media del aire podría aumentar entre 1,4 y 5,8 grados centígrados¹². El nivel del mar podría subir entre 9 y 88 cm (Institute for Plasma Physics Rijnhuizen, 2005). Las consecuencias de este cambio climático serían inundaciones en las zonas bajas de todos los continentes, y aún más extremos eventos climáticos: huracanes y lluvias torrenciales en zonas tropicales, sequías en las zonas áridas, olas de calor. Quienes viven en los países en desarrollo son los más vulnerables a estos cambios (ITDG, 2004).

USO DE COMBUSTIBLES FÓSILES

Las principales emisiones de CO₂ que se vierten a la atmósfera provienen del sector transporte, el cual consume la mayor parte de los combustibles fósiles. Un kWh de trabajo mecánico de un motor diésel produce alrededor de 1.020 g de CO₂, mientras que un litro de gasolina o del mismo diésel vierte a la atmósfera entre 2.750 y 2.400 gramos respectivamente (Fernández, 1998) (ver Tabla 1.2).

Tabla 1.2: Emisión estimada de CO₂ durante la producción y utilización de combustibles derivados del petróleo

Etapa	Gasolina (g CO ₂ / litro)	Diésel (g CO ₂ / litro)
Extracción	30	26
Transporte	13	11
Refinamiento	28	24
Utilización	2.680	2.360
Total	2.751	2.421

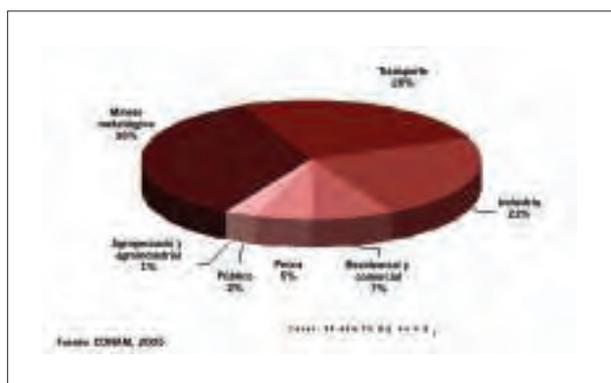
Fuente: Fernández, 1998.

¹¹ Área geográfica y climática del continente africano que limita al norte con el desierto del Sahara, al sur con las sabanas y selvas del Golfo de Guinea y de África Central, al oeste con el Océano Atlántico y al este con el Nilo Blanco.

¹² A modo de comparación, la diferencia de temperaturas entre la última era glacial y la actualidad es de sólo 6 grados.

Como se mencionó anteriormente, en el Perú el 45% de las emisiones de CO₂ corresponden al consumo de energía fósil. En la Figura 1.9 se muestra la distribución de estas emisiones considerando el consumo energético por sectores, destacando los sectores minero-metalúrgico, transporte e industria como los principales emisores, de acuerdo con el Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero de 1994 (CONAM, 2001).

Figura 1.9: Emisiones de CO₂ en el Perú provenientes del consumo energético por sectores (año 1994)



CAMBIOS EN EL USO DEL SUELO: DEFORESTACIÓN

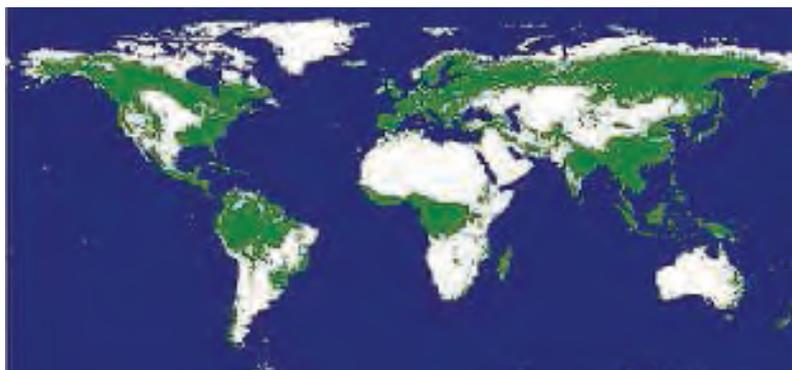
La deforestación es el proceso por el cual la Tierra pierde sus bosques en manos de los hombres. Entre los principales agentes de la deforestación están los agricultores que practican la roza y quema, los agricultores comerciales, los ganaderos, los madereros, los recolectores de leña y los planificadores de infraestructura.

El área forestal mundial ha estado disminuyendo durante siglos, el problema se agrava con la revolución industrial y adquiere proporciones alarmantes durante la segunda mitad del siglo XX (ver Figura 1.10 y Figura 1.11). Se calcula que entre 1850 y 1980 se taló el 15% de los bosques y tierras boscosas del mundo. Entre 1980 y 1995 el área forestal total perdida fue de aproximadamente 200 millones de hectáreas (casi dos veces la superficie del Perú). Entre 1990 y el 2000 se perdieron casi 9 millones de hectáreas de bosque por año (0,22% al año), y entre el 2000 y el 2005, 7,3 millones (0,18%). Actualmente, el mundo posee poco menos de 4 mil millones de hectáreas de bosques, que cubren alrededor del 30% de la superficie continental (FAO, 2007). Solamente el área de bosque templado de los países desarrollados (Europa y Norteamérica), aunque en muy pequeña proporción, está aumentando desde la década de los años 80.

América Latina y el Caribe (ALC) y África son las dos regiones del mundo que están perdiendo sus bosques a mayor velocidad. El 22% de los bosques del mundo se encuentran en ALC. A pesar de los esfuerzos de los gobiernos por incrementar las áreas de bosque bajo protección, mejorar la institucionalidad en el sector forestal, desarrollar sistemas innovadores de manejo forestal y fortalecer la cooperación regional acerca de

los problemas de los bosques, la tasa de pérdida anual de bosques entre 2000 y 2005 para ALC fue de 0,51%, mayor que la tasa anual de la década de los años 90 (0,46%) (FAO, 2007).

Figura 1.10: Cubierta forestal sobre la Tierra hace 8 mil años



Fuente: WRI, 1987.

Figura 1.11: Cubierta forestal primaria actual



Fuente: WRI, 1987.

El consumo de leña y carbón vegetal con fines energéticos es uno de los principales causantes de la deforestación. Más de dos billones de personas dependen de leña y carbón para cocinar sus alimentos, y su consumo promedio *per cápita* varía entre 500 y 700 kg de leña al año. Las cocinas a leña tradicionales son además muy ineficientes, y aprovechan sólo el 10% de la energía generada. Así, en el año 2002 alrededor de 2.450 millones de metros cúbicos de combustibles derivados de la madera fueron utilizados en todo el mundo, lo cual representa el 61% de toda la madera explotada (WEC, 2004).

Según el IPCC (2007), las emisiones de CO₂ debido a la deforestación habrían sido de alrededor de 5,9 Gt de CO₂ al año durante la década de los años 90. La deforestación es la segunda fuente de emisiones antropogénicas de CO₂, luego de los combustibles fósiles.

IMPACTOS EN LA SALUD PÚBLICA

La contaminación del aire en las ciudades es un problema no sólo ambiental, sino también de salud pública. Según el Consejo Nacional del Ambiente del Perú (CONAM) se producen 4 mil muertes por año en Lima debido a la excesiva presencia de azufre en el aire de la ciudad, proveniente de las emisiones del sistema de transporte urbano (González del Valle, 2004). Asimismo, el Centro de Investigación y de Asesoría del Transporte Terrestre (CIDATT) calculó en cerca de 13.500 las muertes por el mismo motivo cada año en todo el país. A nivel macrorregional en diversas partes del mundo, las emisiones de la combustión de carbón y derivados del petróleo dan lugar a la lluvia ácida y a la degradación de los ecosistemas.

EFFECTOS EN LA ECONOMÍA Y EN LA POLÍTICA INTERNACIONAL

El agotamiento de los combustibles fósiles es una realidad inminente. En 1973 se produjo la primera crisis del petróleo, originada por un embargo petrolífero a los países de la OPEP. El precio del barril de petróleo se elevó desde US\$ 2 a US\$ 13. En 1980 se produjo un nuevo salto en el precio, llegando hasta los US\$ 32 por barril (Castro y Colmenares, n/d). En los últimos 3 años, el barril de petróleo ha experimentado varias alzas de precio, alcanzando un récord por encima de los US\$ 79 en julio del 2006 (una alza del 216% en comparación con el precio en el 2003 – alrededor de 25 US\$). Estos incrementos han tenido diversas causas coyunturales, pero la tendencia al alza parece constante y de largo plazo.

Entre las causas del aumento del crudo están (Finanzas.com, 2005; Universia College at Wharton, 2006; Brown, 2006):

- ▶ El crecimiento de la demanda, procedente principalmente de economías en crecimiento, como las de China e India, ante lo cual el mercado no está preparado. China es en este momento el segundo consumidor mundial de crudo, después de Estados Unidos.
- ▶ Los huracanes que afectaron el golfo de México en el 2005, dañando y paralizando numerosas instalaciones petrolíferas norteamericanas en la zona.
- ▶ La limitada capacidad de producción: los países de la OPEP estarían alcanzando ya su capacidad máxima de producción.
- ▶ La limitada cantidad de refinerías de petróleo en el mundo, que no satisfacen los niveles de consumo de gasolina, sumado a incendios y posibles intentos de ataques terroristas en este tipo de instalaciones.
- ▶ Los conflictos en zonas de producción: la última guerra y la persistente violencia en Irak, las malas relaciones entre Venezuela e Irán y Estados Unidos, y conflictos en Nigeria. Productores más estables, como Arabia Saudita, están también al límite de su capacidad, y no pueden responder adecuadamente a los vacíos generados cuando hay conflictos en otros países productores, como sucedió durante la primera guerra del Golfo Pérsico en los años 1990 y 1991.

►Algunos analistas opinan que la subida de precios es principalmente especulativa. Los especuladores estarían adelantándose a un fuerte crecimiento de la demanda (por parte de China e India, principalmente), a la disminución de la oferta, o a ambas cosas.

Las consecuencias macroeconómicas de estos incrementos de precio han sido, hasta el momento, moderadas, pero existen. Los países del G7 están sufriendo la inflación más alta desde la década de los años 90, y en respuesta muchos países están elevando las tasas de interés. Los altos precios del petróleo están actuando como un «impuesto» sobre el consumo, y así los consumidores están empezando a cambiar sus costumbres para adaptarse a esta nueva situación. Ya se nota, por ejemplo, un cambio en las preferencias de compra de vehículos en Estados Unidos: los carros pequeños y económicos y los híbridos están creciendo en las ventas. En el mediano plazo, si los hogares se ven obligados a gastar más en petróleo, tendrán que ahorrar en otros bienes, lo cual podría frenar el crecimiento económico con consecuencias nefastas especialmente para los países en desarrollo, lo cual a su vez tendría el efecto de re-estabilizar los precios del petróleo (Brown, 2006; IEA, 2006b). Sin embargo, hasta el momento la demanda de crudo sigue en aumento en Estados Unidos, China e India.

A pesar de que estos aumentos de precio aún no han tenido un impacto serio sobre la demanda de petróleo, se ha despertado la conciencia global acerca del problema energético, generándose interés en la diversificación de las fuentes de energía y en la eficiencia energética. El sistema energético actual es muy vulnerable a las disrupciones en el abastecimiento, y por lo tanto, la protección de las fuentes de energía aparece nuevamente como prioridad en la agenda política internacional (IEA, 2006b).

1.1.5 ALTERNATIVAS

Es necesario conciliar las metas de protección ambiental y de seguridad energética teniendo en cuenta un suficiente, adecuado y equitativo abastecimiento de energía para toda la humanidad. Hoy, de manera urgente, se necesita frenar el crecimiento de la demanda de combustibles fósiles, incrementar la diversidad del abastecimiento energético – en cuanto a fuentes y proveedores – y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

Para poder asegurar la disponibilidad de fuentes energéticas durante las próximas décadas se tendría que empezar a implementar una serie de políticas coherentes, en todos los niveles, orientadas a facilitar la transición de la presente estructura energética a un sistema más diversificado de ofertas y demandas de energía. Necesitamos encontrar nuevas alternativas energéticas y realizar esfuerzos para aprovechar todos los recursos energéticos locales, tanto convencionales como no convencionales. La toma de decisiones en el sector energético tiene graves implicancias y no debe ser abandonada exclusivamente en manos de los gobiernos, pues es un problema que nos compete a todos. Se requieren entonces acciones coordinadas y decididas por parte de los gobiernos y participación por parte de la población organizada, sociedad civil y opinión pública.

No hay una solución única al problema energético. Sólo con una combinación de estrategias (ahorro, eficiencia, cambio de matriz energética, diversificación de fuentes y uso de energías renovables; entre otras) podría haber una salida.

EL AHORRO Y LA EFICIENCIA ENERGÉTICA

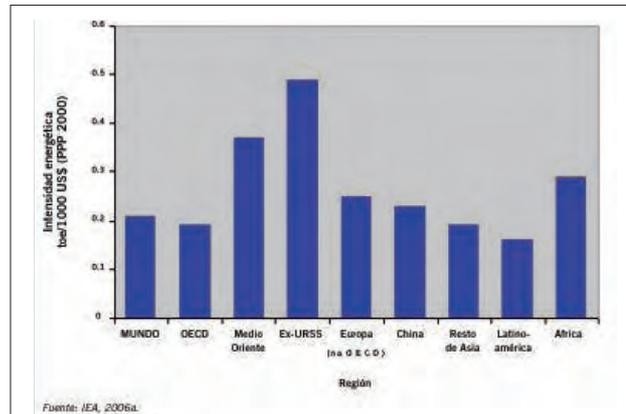
La creciente conciencia sobre los límites de la energía ha llevado a mejoras en la eficiencia con la cual la energía es utilizada en la industria, la generación eléctrica, iluminación, electrodomésticos, transporte, y calefacción o acondicionamiento de viviendas. Algunas maneras de ahorrar energía en una vivienda se pueden ver en la Tabla 1.3.

Tabla 1.3: Algunas tecnologías y prácticas eficientes en viviendas y edificios

Construcción	<ul style="list-style-type: none">- Ventanas eficientes (doble vidrio).- Aislamiento en paredes, piso y techo.
Acondicionamiento del espacio	<ul style="list-style-type: none">- Reducción de las filtraciones de aire.- Sistemas eficientes de acondicionamiento de aire (aislamiento térmico, intercambiadores de calor mejorados, refrigerantes avanzados, motores más eficientes).- Compresoras, centrífugas, ventiladores y bombas eficientes, y sistemas variables en edificios comerciales grandes.
Aparatos	<ul style="list-style-type: none">- Compresores avanzados y mejor aislamiento en refrigeradores.- Mayores velocidades de giro en lavadoras y secadoras de ropa.
Cocina	<ul style="list-style-type: none">- Cocinas a biomasa de eficiencia mejorada.- Cocinas a gas eficientes (en la ignición y en los quemadores).
Iluminación	<ul style="list-style-type: none">- Lámparas fluorescentes compactas.- Sistemas de control de la iluminación avanzados (incluyendo sensores de luz y de ocupación).- Iluminación específica por actividad.
Motores	<ul style="list-style-type: none">- Velocidades variables.- Optimización del tamaño.- Mejora de la calidad de potencia.
Otros	<ul style="list-style-type: none">- Sistemas de gestión energética.- Uso de sistemas solares pasivos (diseño de las construcciones orientado según la luz solar).- Calentadores de agua solares.

Fuente: PNUD, UNDESA y WEC, 2004.

El objetivo de mejorar la eficiencia energética es *reducir la cantidad de energía primaria necesaria para un determinado nivel de actividad económica* (así, el impacto de esta actividad económica sería menor). La eficiencia energética puede ser medida a nivel macro en términos de *intensidad energética*, que es la cantidad de energía primaria utilizada por unidad de Producto Interno Bruto de una economía (Ver Figura 1.12). En promedio, la intensidad energética del mundo ha disminuído en alrededor del 25% desde 1971 (IEA, 2004). Los países industrializados están reduciendo su intensidad energética, tanto por la expansión del sector servicios (banca, seguros, comercio), que es menos intensivo en energía que la industria, como porque sus mercados se están saturando de artefactos (cada hogar tiene una demanda límite por cocinas, refrigeradoras, automóviles, etc. que ya se está alcanzando) y por el desarrollo de tecnologías de transformación energética más eficientes. Los países en desarrollo, en cambio, están incrementando su intensidad energética porque aún están en proceso de industrialización y desarrollo de sistemas de transporte y electrificación (PNUD, UNDESA y WEC, 2004).

Figura 1.12: Intensidad energética por regiones del mundo (año 2004)

Las mejoras en la eficiencia energética pueden ser logradas desde la producción de energía, su distribución y su uso final. La eficiencia de convertir energía primaria en energía útil es actualmente, en promedio, alrededor de un tercio (1/3). Es decir, dos tercios (2/3) de la energía primaria se pierden en los procesos de conversión y distribución, mayormente en forma de calor de baja temperatura. Otras pérdidas se producen durante la utilización de la energía – por ejemplo, mediante el uso de focos incandescentes para iluminación (según el Institute for Plasma Physics Rijnhuizen, 2005, el 95% de la energía que estos focos utilizan se pierde en forma de calor, no se utiliza para iluminar). Es entonces con pequeños cambios en la forma como utilizamos la energía que se pueden lograr reducciones costo-efectivas y muy significativas en el consumo energético. Se ha calculado que en países industrializados se podría reducir el requerimiento de energía primaria para un determinado nivel de servicios energéticos en un 25% a 35% a lo largo de los próximos 20 años. En países en transición esta reducción podría ser del 40%, y en países en desarrollo entre 30% y 45% (PNUD, UNDESA y WEC, 2004).

Uno de los mayores retos será garantizar que los países en desarrollo puedan cumplir con sus metas de crecimiento económico, desarrollo social e industrialización – es decir, satisfacer su creciente demanda energética – sin producir mayores impactos. Para lograr esto, se requieren inversiones significativas en abastecimiento energético y en la adopción de tecnologías eficientes desde el principio. La idea es que pasen de su nivel actual (de muy simple tecnología) a un nivel de tecnologías modernas y eficientes, sin pasar por los estadios intermedios de alta contaminación (PNUD, UNDESA y WEC, 2004).

Por diversas razones, el potencial técnico y económico de la eficiencia energética ha sido siempre relegado. Lograr altas eficiencias – especialmente durante el uso final de los servicios energéticos – implica una gran cantidad de actores, ya que es una actividad descentralizada, dispersa, que depende de los consumidores. Además, al tener poca visibilidad, es una causa poco popular para políticos, los medios u otro tipo de líderes.

Finalmente, las imperfecciones del mercado – principalmente los existentes subsidios a la energía y las externalidades¹³ - deben ser superadas mediante adecuados instrumentos de política, tales como: estándares de eficiencia, etiquetado de productos y aparatos electrodomésticos, acuerdos voluntarios, adecuada información a los usuarios, remoción de subsidios, sistemas adecuados de pago por la energía e incorporación de externalidades (PNUD, UNDESA y WEC, 2004).

LAS ENERGÍAS RENOVABLES

Una fuente renovable de energía se repone constantemente, y por lo tanto nunca se va a agotar (al menos no en tiempos humanos). El Sol es la fuente primaria que da origen a todas las demás fuentes renovables:

- ▶ Directamente, la energía solar se puede aprovechar para la generación de calor (termas solares, secadores solares, cocinas solares) o para la producción de electricidad (sistemas fotovoltaicos).
- ▶ El calor del Sol calienta el aire sobre la Tierra, generándose gradientes de temperatura y presión que dan origen a los vientos. El viento es la base de la energía eólica, que se puede utilizar para realizar trabajos mecánicos (molinos y bombas de viento) o también para producir electricidad (aerogeneradores).
- ▶ El calor del sol también da lugar al *ciclo hidrológico* por el cual el agua sobre la Tierra se evapora, condensa, precipita y fluye en forma de ríos. Los ríos son la fuente de la energía hidráulica utilizada desde la antigüedad para realizar trabajo mecánico (molinos de agua) y en las hidroeléctricas para generar electricidad. Cabe mencionar que algunos autores no consideran a la energía hidroeléctrica convencional (es decir, las grandes represas hidroeléctricas) como una fuente renovable en sí, debido a los grandes impactos ambientales y sociales que pueden generar (cambios en los caudales de ríos que afectan a la fauna y las actividades económicas en la zona, desvío de ríos, desplazamiento de poblaciones, etc). Sin embargo, las centrales hidroeléctricas de tamaño pequeño (mini y microcentrales hidroeléctricas) sí son consideradas apropiadas.
- ▶ La energía de la biomasa, es decir, proveniente de las plantas y animales (leña, residuos agroindustriales, alcohol, aceites y grasas, etc.) también proviene primitivamente del sol (mediante el proceso de *fotosíntesis*) y es considerada renovable si su cosecha es sostenible y se permite que vuelvan a crecer. En la siguiente sección describiremos más detalladamente esta fuente de energía.

¹³ Por externalidades se conoce a los impactos económicos que no son percibidos por el productor o por el consumidor de un bien. La contaminación ambiental, por ejemplo, es una externalidad: si una fábrica de alimentos arroja sus desperdicios a un río estará causando un impacto en las actividades de los pescadores (menor pesca), de los residentes aguas abajo (peor calidad del agua), o de otras industrias que requieren el agua. Como la fábrica de alimentos no paga por esa contaminación (o no se encarga de evitarla, mediante una planta de tratamiento, por ejemplo), la economía en su conjunto debe hacerse cargo de esa «externalidad»: ya sea la sociedad construye una planta de tratamiento, o los residentes sufrirán de enfermedades, los pescadores tendrán menores ingresos, las otras industrias tendrán mayores costos. Lo mismo sucede con el uso de la energía: actualmente nadie paga directamente por las emisiones de efecto invernadero que nuestro consumo energético está causando. Sin embargo, la economía (y la sociedad) mundial lo paga al sufrir los impactos climáticos de esta actividad: sequías, inundaciones, huracanes, olas de calor, etc.

- ▶ El calor geotérmico, que se encuentra dentro de la Tierra, puede ser denominado renovable porque existe en abundancia y siempre estará disponible para la humanidad.
- ▶ La energía del mar, ya sea debido a las mareas o a las olas, es una fuente que recién se está empezando a aprovechar en la producción de electricidad.

Algunas de estas fuentes renovables, como el sol y el viento, están disponibles en casi todo el mundo, pero sus cantidades dependen de la ubicación, e influyen en la rentabilidad de su uso. Los sistemas para generar electricidad a partir de estas fuentes son normalmente pequeños, como los paneles solares o las turbinas eólicas. Esto los hace apropiados para sistemas descentralizados de generación de electricidad, óptimos para la electrificación rural y más eficientes que los sistemas centralizados actuales porque aprovechan fuentes energéticas locales, reduciendo los costos – y las pérdidas – durante el transporte y distribución (Institute for Plasma Physics Rijnhuizen, 2005).

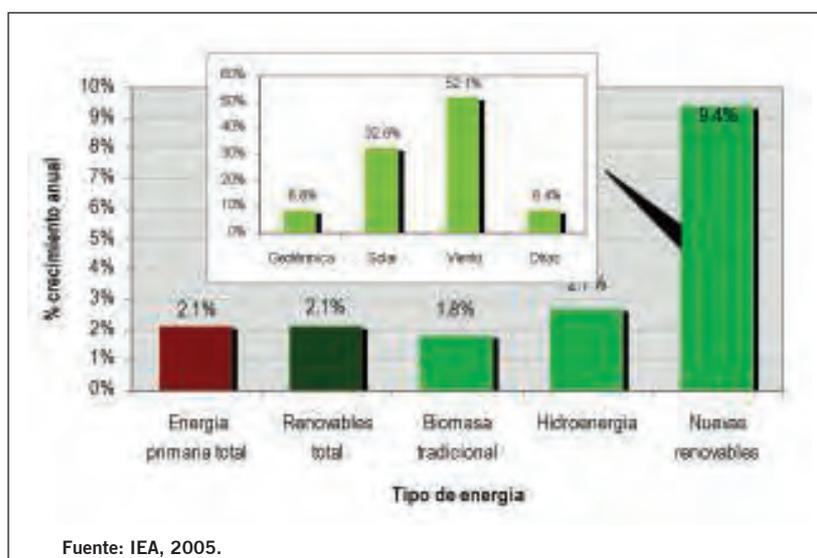
Las principales ventajas de las energías renovables son, entonces (PNUD, UNDESA y WEC, 2004; Bayod *et al.*, n/d):

- ▶ Permiten diversificar las fuentes, tecnologías e infraestructura para la producción de calor, combustibles y electricidad
- ▶ Mejoran el acceso a fuentes limpias de energía
- ▶ Reemplazan el consumo de combustibles fósiles, permitiendo su ahorro para otras aplicaciones o para su uso futuro
- ▶ Mejoran la flexibilidad de los sistemas eléctricos ante cambios en la demanda
- ▶ Suelen ser más eficientes que los sistemas convencionales
- ▶ Reducen la contaminación y las emisiones de los sistemas energéticos convencionales
- ▶ Reducen la dependencia y el gasto en combustibles importados
- ▶ Crean puestos de trabajo.

Por estas razones, en los últimos años su uso se está difundiendo cada vez más aceleradamente. Entre 1971 y el 2000, el abastecimiento de energía de fuentes renovables¹⁴ mostró un crecimiento anual promedio del 2,1%, casi igual que el crecimiento de la producción total de energía primaria (ver Figura 1.13). La energía de la biomasa tradicional creció solamente 1,8%, y la hidroenergía 2,7%. Las nuevas renovables (solar, viento, geotérmica, mareomotriz y otras) crecieron muchísimo más: un promedio de 9,4% en el mismo periodo, teniendo a la cabeza a la energía del viento, que creció 52,1%, seguida por la solar, que creció más del 32%. Este crecimiento de las nuevas renovables se ha dado principalmente en países industrializados, donde las políticas de Estado están estimulando su expansión. Sin embargo, pese a su crecimiento acelerado, las energías renovables aún representan un porcentaje mínimo de la energía utilizada en el mundo: poco más del 2% (IEA, 2005; PNUD, UNDESA y WEC, 2004).

¹⁴ Incluyendo las nuevas renovables (sol, viento, geotérmica, pequeña hidráulica, biomasa moderna y mareomotriz), así como la biomasa tradicional (leña, estiércol, carbón vegetal y residuos orgánicos) y la hidráulica.

Figura 1.13: Crecimiento promedio del abastecimiento de energías renovables (año 1971-2000)



1.2 LA BIOMASA

El término *biomasa* significa, en su definición más amplia, cualquier tipo de materia orgánica que haya tenido su origen inmediato en algún proceso biológico. Este concepto comprende tanto a los productos de origen vegetal como a los de origen animal, incluyendo los materiales procedentes de su transformación natural o artificial. Quedan excluidos los combustibles fósiles, porque aunque derivan de materiales biológicos, a través del tiempo han sufrido transformaciones que han alterado profundamente su naturaleza.

Actualmente se ha extendido el uso del término biomasa para denominar a un tipo de energía renovable basada en la materia orgánica anteriormente descrita.

La energía de la biomasa procede de la energía solar fijada por los vegetales mediante la fotosíntesis y acumulada en los enlaces químicos de las moléculas orgánicas que los conforman – es entonces una forma de energía química. Esta energía puede ser aprovechada de forma directa por combustión (la energía se libera al romperse los enlaces de los compuestos orgánicos durante la combustión) o de forma indirecta a través de compuestos derivados como alcoholes, ésteres, gases de gasógeno o de digestión anaeróbica – los biocombustibles (los cuales a su vez se usarán en un proceso de combustión) (Fernández, 2002).

Cuando se quema, la biomasa libera agua y dióxido de carbono (CO₂), el principal gas de efecto invernadero. Pero cuando esta biomasa es producida – cuando las plantas que dan origen a la biomasa crecen – una cantidad equivalente de CO₂ es tomada de la atmósfera mediante la fotosíntesis. La emisión neta de CO₂ será nula mientras que se continúe replantando vegetales para la producción de nueva biomasa (Institute for Plasma Physics Rijnhuizen, 2005).

Anualmente las plantas fijan, por medio de la fotosíntesis, 70 mil millones de toneladas de carbono (Hoeneisen, 1997) con un contenido de energía equivalente a unas diez veces el consumo mundial de energía anual. El contenido energético de la biomasa almacenada en la superficie terrestre es semejante al de las reservas probadas de todos los combustibles fósiles. La energía total de las reservas de carbón representa tan sólo unos 130 años de fotosíntesis neta.

Sin embargo, del total de la energía que se consume en el mundo, la biomasa supone sólo el 10,6%, centrándose el mayor consumo en los países en vías de desarrollo (IEA, 2006) – principalmente en forma de leña, pero también estiércol y residuos de cosechas: la denominada biomasa tradicional. El consumo de este tipo de biomasa puede ocasionar graves problemas de deforestación, erosión, empobrecimiento de suelos e inundaciones.

Los países desarrollados consumen proporciones mucho menores de biomasa, y además de diferente tipo: biomasa procedente principalmente de residuos orgánicos de origen industrial, doméstico, agrícola y forestal. Igualmente, en los últimos años se está empezando a utilizar biomasa cultivada con fines energéticos.

Las fuentes de biomasa para la obtención de energía pueden clasificarse de diferentes maneras, por ejemplo, según su origen (Fernández, 2002):

- ▶La biomasa natural: producida espontáneamente en las tierras no cultivadas y que el hombre ha utilizado tradicionalmente para satisfacer sus necesidades calóricas. El mejor ejemplo es la leña.
- ▶La biomasa residual: producida en las explotaciones agrícolas, forestales y ganaderas, así como los residuos orgánicos de origen industrial y urbano.
- ▶Los cultivos energéticos, producidos con la finalidad de disponer de biomasa transformable en biocombustibles líquidos y sólidos.

O también pueden clasificarse según su forma de uso (Fernández, 2002):

- ▶Biocombustibles sólidos: por ejemplo la paja, leña, astillas, briquetas y pellets, el carbón vegetal.
- ▶Biocombustibles líquidos¹⁵: alcoholes, aceites vegetales y ésteres derivados de ellos (biodiésel), aceites de pirólisis, biohidrocarburos.
- ▶Biocombustibles gaseosos: gas de gasógeno, biogás, hidrógeno.

¹⁵ Algunos autores prefieren denominarlos biocarburantes, ya que se utilizan en motores de combustión interna.

1.2.1 LOS CULTIVOS ENERGÉTICOS

Los cultivos energéticos son cultivos agrícolas o forestales producidos expresamente con fines energéticos en lugar de alimenticios, como ha sido la actividad tradicional en la agricultura. La biomasa obtenida puede transformarse tanto en biocombustibles líquidos para utilizarse en motores de combustión interna o también en biocombustibles sólidos para su aprovechamiento en aplicaciones térmicas para la generación de calor y electricidad.

Entre las características ideales que deben cumplir los cultivos dedicados a fines energéticos cabe citar:

- ▶ Altos niveles de productividad en biomasa con bajos costos de producción para que la producción de biocombustibles sea económicamente viable en relación con los combustibles de origen fósil.
- ▶ No contribuir a la degradación del medio ambiente, de tal forma que el balance ambiental producido por el cultivo sea mejor al que se produciría si la tierra no estuviese cultivada o fuera ocupada por un cultivo tradicional.
- ▶ Posibilidad de desarrollarse en tierras marginales.
- ▶ Posibilidad de recuperar fácilmente las tierras después de finalizado el cultivo energético para realizar otros cultivos si las condiciones socioeconómicas así lo aconsejaren.
- ▶ Requerimientos técnicos convencionales, normalmente disponibles por los agricultores, similares a los empleados para otros cultivos propios de la zona.
- ▶ Tener un balance energético positivo, es decir, que la energía neta contenida en la biomasa producida sea superior a la gastada en el cultivo, en la obtención de los productos y en la generación y distribución de energía utilizable.

Los sistemas agroenergéticos constituyen verdaderas agroindustrias en las que la producción y la transformación deben estar íntimamente relacionadas. El desarrollo de los cultivos energéticos solamente se justifica si paralelamente se instala la correspondiente industria energética que utilice como materia prima la biomasa producida.

La relación entre los cultivos y la industria energética debe abarcar temas que van desde cuestiones técnicas, económicas y geográficas, hasta los aspectos contractuales que aseguren el suministro de la materia prima necesaria para que la industria funcione, sin pasar por alto aspectos culturales y sociales del ámbito humano donde se vayan a realizar. Los centros de transformación deben estar próximos a los lugares de producción, ya que sería inconcebible gastar en el transporte de la biomasa más energía de la que luego se podría obtener de ella.

Entre las ventajas directas de los cultivos energéticos, podemos mencionar (Fernández, 1997; 2002):

- ▶ Los cultivos energéticos que son perennes protegen al suelo de la erosión, eliminando las labores de barbecho y la pérdida de suelo que se deriva de su práctica continuada.
- ▶ Para ser rentables deben tener bajos niveles de insumos, por lo que la agricultura resultante produciría un menor impacto ambiental que la tradicional.

- ▶ Pueden ayudar a mantener la fertilidad del suelo gracias a la incorporación de los residuos del cultivo posteriormente.
- ▶ Pueden ser utilizados para reforestar o revegetar tierras previamente degradadas.
- ▶ Crean puestos de trabajo tanto en el sector agrícola como en el de la transformación, manteniendo la actividad agrícola y fijando la población rural.
- ▶ Pueden proveer de seguridad energética en zonas rurales.

Entre los inconvenientes que los cultivos energéticos pueden presentar, tenemos (Fernández, 2002):

- ▶ Necesidad de buscar nuevos cultivos distintos de los tradicionales ya que éstos han sido seleccionados para fines alimenticios o industriales, pero no energéticos. Será necesario iniciar trabajos de domesticación y mejora genética cuando se trate de adaptar especies silvestres.
- ▶ Falta de experiencia del agricultor y de los técnicos del sector agrícola en ese tipo de cultivos. Es posible que haya que desarrollar técnicas específicas de cultivo y prever la necesidad de estudiar posibles nuevas plagas y enfermedades que aparezcan.
- ▶ Producciones estacionales y por ende la necesidad (y los costos) de almacenar la biomasa para garantizar el suministro durante todo el año o combinar distintos tipos de cultivos y residuos.
- ▶ Desconocimiento entre sectores agrícola y energético.
- ▶ En caso de minifundios, la necesidad de articular y establecer contratos con numerosos agricultores a la vez.

Asimismo, los cultivos energéticos comparten con la producción agrícola tradicional una serie de problemas, como la dependencia a las condiciones climatológicas y sus fluctuaciones, el uso de fertilizantes y pesticidas, la erosión del suelo (si el manejo no es adecuado), la pérdida de ecosistemas y biodiversidad (si se sustituye vegetación natural por monocultivos) y el deterioro del paisaje (ídem). Sin embargo, si los cultivos energéticos sustituyen cosechas anteriores, el efecto neto puede ser insignificante.

Los cultivos aprovechados en la actualidad con fines energéticos se pueden clasificar en tres grupos:

- ▶ Cultivos productores de biomasa lignocelulósica para aplicaciones térmicas. Por ejemplo:
 - especies herbáceas: cardo (*Cynara cardunculus*);
 - especies leñosas: sauces (*Salix* sp.), chopos (*Populus* sp.), eucaliptos (*Eucalyptus* sp.), acacias (Familia *Mimosaceae*).
- ▶ Cultivos alcoholígenos, productores de azúcares o polisacáridos fermentables y que sirven para la producción de bioetanol. Por ejemplo:
 - caña de azúcar (*Saccharum officinarum*),
 - pataca (*Helianthus tuberosus*),
 - remolacha (*Beta vulgaris*),
 - sorgo azucarero (*Sorghum bicolor*).
- ▶ Cultivos oleaginosos, productores de aceite para su transformación en biodiésel. Por ejemplo:
 - colza (*Brassica napus*),
 - girasol (*Helianthus annuus*),
 - soya (*Glycine max*),
 - palma aceitera (*Elaeis guineensis*),
 - piñón (*Jatropha curcas*).

1.3 EL BIODIÉSEL

El biodiésel es un combustible renovable derivado de aceites o grasas de origen vegetal o animal. El prefijo *bio* hace referencia a su naturaleza renovable y biológica en contraste con el combustible diésel tradicional derivado del petróleo; mientras que *diésel* se refiere a su uso en motores de este tipo. Como combustible, el biodiésel puede ser usado en forma pura o mezclado con diésel de petróleo.

El National Biodiesel Board (la asociación de productores norteamericanos de biodiésel) lo define como un *combustible compuesto de ésteres mono-alquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de aceites o grasas, vegetales o animales*.

Este biocombustible se obtiene mediante un proceso químico llamado transesterificación, en el cual los aceites orgánicos son combinados con un alcohol y alterados químicamente para formar un éster etílico o metílico, el cual recibe finalmente el nombre de biodiésel. Estas moléculas resultantes están compuestas por un ácido graso de cadena larga y un alcohol. En el Capítulo 5 se describe detalladamente el proceso de producción de biodiésel.

1.3.1 ANTECEDENTES DEL BIODIÉSEL

La idea de usar aceites vegetales como combustible para los motores de combustión interna data de 1895, cuando el Dr. Rudolf Diesel desarrollaba su motor. En la presentación del motor diésel en la Exposición Mundial de París, en 1900, el Ing. Diesel usaría aceite de maní como combustible, o, mejor dicho, como biocombustible.

Años después Diesel fue muy claro al señalar que *«el motor diésel puede funcionar con aceites vegetales, esto podría ayudar considerablemente al desarrollo de la agricultura de los países que lo usen así»*. Hacia 1912 afirmaría que *«el uso de los aceites vegetales como combustibles para los motores puede parecer insignificante hoy en día, pero con el transcurso del tiempo puede ser tan importante como los derivados del petróleo y el carbón en la actualidad»* (Shay, 1993).

Las predicciones de Diesel tomarían su tiempo para empezar a tomar a cuerpo y, en este lapso de, más o menos un siglo, los motores diésel evolucionarían y se perfeccionarían utilizando fundamentalmente destilados medios de petróleo con mucha menor viscosidad que los aceites vegetales. La principal razón por la que actualmente no podríamos usar aceites vegetales directamente en los motores es, precisamente, su mayor viscosidad. La química proporciona una solución para disminuir esta viscosidad: la transesterificación. Este proceso fue desarrollado por los científicos E. Duffy y J. Patrick a mediados del siglo XIX, cuarenta años antes que Diesel desarrollara su motor de combustión interna. Los aceites vegetales (y también las grasas animales) están constituidos por moléculas

(ésteres) de ácidos grasos y glicerol. A éste último, los aceites y grasas le deben su elevada viscosidad. La transesterificación, en sencillo, consiste en reemplazar el glicerol (alcohol trivalente) por un alcohol monovalente («más ligero») usualmente metanol o etanol, formando moléculas más pequeñas (ésteres monoalquílicos, comúnmente denominado biodiésel), con una viscosidad similar a la del combustible diésel derivado del petróleo. Asimismo, se produce glicerina, sustancia que tiene numerosos usos en diversas industrias.

Durante el siglo XX, algunos intentos se realizaron para utilizar aceites como combustible para vehículos. Antes de la segunda guerra mundial se introdujo el uso de aceites transesterificados como combustible en vehículos pesados en el África. Durante la década de los años 40, los franceses trabajaron con el aceite de piñón (*Jatropha curcas*) como combustible sin tener resultados positivos. Posteriormente se realizaron algunos ensayos en la República Federal de Alemania y Austria con aceite de colza (*Brassica napus*); y en Cabo Verde y en Malí también con aceite de piñón, obteniéndose excelentes resultados.

Sin embargo, el resurgimiento de la idea de Diesel, de emplear aceites vegetales en sus motores, empieza a cobrar fuerza nuevamente hacia finales del siglo XX, esta vez bajo la forma de biodiésel, e impulsado, principalmente, por preocupaciones ambientales relacionadas con el cambio climático y la necesidad de encontrar alternativas al uso de combustibles fósiles. Hasta hace pocos años era posible identificar otras motivaciones, además de las ecológicas, para impulsar su uso en diferentes regiones; por ejemplo, los excedentes de la producción de soya en los Estados Unidos, o los excedentes de la producción agraria en Europa que impulsaron la política de poner tierras en descanso para no afectar los precios de los productos agrícolas. En ambos casos, la producción de biodiésel, sea a partir de soya en los Estados Unidos, o de otros cultivos energéticos como la colza o el girasol en Europa, aparecía como excelente alternativa a estas situaciones específicas, a la vez que contribuía con la mitigación del cambio climático. No obstante, requería aún de importantes subsidios o exenciones tributarias para asegurar su viabilidad, ya que los precios de los aceites vegetales eran sustancialmente mayores que los del diésel.

Es con la espectacular subida de los precios del petróleo a partir del 2004, que los precios de los aceites vegetales y las grasas animales se empiezan a equiparar con los del diésel y generan este reciente *boom* de los biocombustibles líquidos a nivel mundial, que incluye también al bioetanol, que es básicamente etanol o alcohol etílico, que puede utilizarse como complemento o sustituto de la gasolina. Y aquí valdría la precisión, a manera de resumen, que, cuando hablamos de biodiésel, básicamente nos referimos a un complemento o sustituto del diésel, pero producido a partir de aceites vegetales o grasas animales.

OPORTUNIDADES, BARRERAS Y PUNTOS POR RESOLVER

En este capítulo repasaremos las principales *razones* ambientales, económicas, sociales y técnicas que existen *para proponer al biodiésel como una opción para contribuir a mejorar el sistema energético, las razones que cuestionarían su desarrollo, y los temas que aún se encuentran en debate y discusión. ¿Por qué – o por qué no – deberíamos apostar por el biodiésel y a qué se atribuiría su reciente boom?*

2.1 OPORTUNIDADES PARA LA PRODUCCIÓN Y USO DE BIODIÉSEL

2.1.1 REDUCCIÓN DE LA MAYORÍA DE EMISIONES CONTAMINANTES

Diferentes estudios han demostrado que el biodiésel reduce substancialmente la emisión de la mayoría de gases y partículas contaminantes de la atmósfera (ver Tabla 2.1). Al ser un combustible oxigenado, el biodiésel tiene una combustión más completa que el diésel, mejorando por eso la composición de las emisiones.

Para tener una idea correcta de los beneficios del uso del biodiésel es necesario diferenciar las emisiones producidas en el instante mismo de su utilización, es decir durante la combustión de las emisiones ocurridas a lo largo del ciclo de vida del combustible, las cuales incluyen todas aquellas producidas en las diferentes etapas de producción, transporte, procesamiento y utilización.

El biodiésel reduce las emisiones de partículas sólidas menores a 10 micrones (PM10), monóxido de carbono (CO) y óxidos de azufre (SOx), peligrosos agentes contaminantes. La Environmental Protection Agency (EPA, 2002) en un estudio compilatorio de diversas investigaciones sobre emisiones vehiculares con biodiésel, concluyó que las emisiones vehiculares de material particulado se reducían en un 47% cuando se usaba biodiésel, y las de monóxido de carbono en un 48%. Sheehan *et al.*, (1998), utilizando biodiésel de soya en buses de transporte urbano, observaron que las emisiones a lo largo del ciclo de vida del biodiésel se reducían en 44%, 35% y 8% para PM10, CO y SOx, respectivamente.

Tabla 2.1: Variación de las emisiones contaminantes del biodiésel respecto al diésel convencional

Agentes contaminantes de la atmósfera	Variación de emisiones	
	Durante la combustión (%)	Total (%)
CO	- 46	- 35
CH ₄	0	- 3
N ₂ O	0	- 66
Hidrocarburos (sin incluir CH ₄)	- 37	238
Hidrocarburos (no especificados)	0	- 39
Hidrocarburos policíclicos aromáticos		- 80
Hidrocarburos policíclicos aromáticos nitrogenados		- 90
Benceno	0	- 96
Formaldehído	0	- 96
PM10	- 68	- 45
Partículas no especificadas	0	- 25
SOx	-100	- 8
NOx	9	13
HCl	0	14
HF	0	- 16

Nota: En rojo, agentes contaminantes en los que el biodiésel produce mayores emisiones que el diésel
Fuentes: Sheehan et al., (1998); Beer *et al.*, (2002).

En el caso de las emisiones durante la combustión, las reducciones eran mucho más significativas: 68% para las PM10, 46% el CO y 100% los SOx, ya que el biodiésel no contiene azufre.

Estudios realizados para el National Renewable Energy Laboratory de los Estados Unidos (Graboski *et al.*, 2003) encontraron que las emisiones de material particulado dependen del contenido de oxígeno del combustible. Analizando las emisiones de biodiésel proveniente de diferentes materias primas, ellos hallaron que todos reducen la emisión de partículas en comparación con el diésel. Para biodiésel con un índice de cetano mayor a 45 aproximadamente, la reducción en PM fue proporcional al contenido de oxígeno. Para biodiésel con número de cetano menor a 45, la reducción fue menor.

Asimismo, comparando ésteres metílicos y etílicos¹⁶ de los mismos ácidos grasos, Graboski *et al.*, (2003) no encontraron diferencias consistentes en sus emisiones. Los índices¹⁷ de peróxido y de acidez, así como el contenido de glicerina del biodiésel tampoco tuvieron ningún efecto sobre las emisiones reguladas (CO, NOx, SO₂, HCs totales, PM) en este estudio.

¹⁶ Éster metílico se refiere al biodiésel producido utilizando metanol, mientras que éster etílico alude al biodiésel elaborado con etanol.

¹⁷ Estos índices se explican con mayor detalle en los Capítulos 4 y 5 del presente libro.

En el caso de los hidrocarburos (HC), si bien el biodiésel produce mayor cantidad en su ciclo de vida, durante la combustión las emisiones disminuyen en un 37% (Sheehan *et al.*, 1998). El estudio de la EPA (2002) encontró que las emisiones de HC durante la combustión disminuyen un 67%. Las emisiones del biodiésel también tienen niveles menores de hidrocarburos policíclicos aromáticos (HPA, posibles cancerígenos), debido a que el biodiésel no contiene compuestos aromáticos de ningún tipo (Beer *et al.*, 2002; Lin *et al.*, 2006).

También se pueden observar significativas reducciones en los compuestos aldehídicos, especialmente el formaldehído y el acetaldehído. En lo que respecta al benceno, las emisiones se reducen prácticamente en un 95% en todo el ciclo de vida del biodiésel, con una combustión totalmente libre de este compuesto cancerígeno (Sheehan *et al.*, 1998).

La combustión del biodiésel produce menos humo visible y menos olores nocivos que el diésel derivado del petróleo. Sheehan *et al.* comprobaron que los beneficios del uso del biodiésel son proporcionales al nivel de mezcla que se utilice, por lo que sus beneficios pueden ser estimados según las proporciones de biodiésel y diésel que se estén usando.

El aprovechamiento del biodiésel puede entonces contribuir a disminuir la polución del aire y los riesgos a la salud pública relacionados con ella, especialmente en grandes ciudades afectadas por la contaminación producida por el transporte automotor.

En el Perú, el tema de la reducción de emisiones del transporte vehicular es crítico: según el Consejo Nacional del Ambiente (CONAM) se producen 4 mil muertes por año sólo en la ciudad de Lima debido a la excesiva presencia de azufre en el aire de la ciudad, proveniente de las emisiones del sistema de transporte urbano (González del Valle, 2004). El dióxido de azufre produce problemas respiratorios y cardíacos, especialmente en personas que sufren de asma y bronquitis, provoca la inflamación de los alveolos pulmonares, y es un agente cancerígeno.

Otros estudios muestran niveles de SO₂ en el aire de Lima que superan los estándares recomendados tanto por la Organización Mundial de la Salud (OMS) como por la normativa nacional (El Comercio, 2005). En el Cercado de Lima, se encontró un promedio de 824,5 µg de SO₂ por m³ de aire, medido en un periodo de 24 horas; en la Av. Túpac Amaru un promedio de 656,3 µg/m³, y en la Av. Larco un promedio de 341,5 µg/m³. El estándar nacional para dióxido de azufre exige como máximo 365 µg/m³, y la recomendación de la OMS es de máximo 125 µg/m³.

El diésel que se comercializa en el Perú tiene contenidos de azufre muy elevados, y recién en los últimos años la normativa al respecto se está haciendo más exigente: hasta principios del año 2006 se permitía un contenido máximo de azufre de 10 mil ppm; desde marzo del 2006 el límite máximo bajo a 5 mil ppm; y se prevé llegar gradualmente a 50 ppm en el año 2010 (los estándares internacionales recomiendan contenidos máximos entre 50 a 350 ppm). El uso de biodiésel ayudaría a disminuir el contenido de azufre en el combustible, reduciendo las emisiones de SO_x y mejorando la calidad del aire de las ciudades.

Un nicho específico para el uso de biodiésel es el de las minas y las construcciones subterráneas, como el trabajo en túneles y socavones. Países como Estados Unidos y Austria han promovido

el biodiésel en este tipo de trabajos, ya que al ser sus emisiones más limpias que las del diésel, contribuyen a reducir los riesgos a la salud ocupacional de los trabajadores. En el Perú también se han iniciado algunas experiencias en este nicho del sector minero, durante el año 2007, varias empresas mineras han manifestado su intención o interés de empezar a producir o adquirir biodiésel para el uso en sus motores.

2.1.2 ALTA BIODEGRADABILIDAD Y BAJA TOXICIDAD

El biodiésel prácticamente no es tóxico en caso de ingestión, tanto para los peces como para los mamíferos. La concentración de biodiésel para que llegue a ser letal por ingestión oral es muy elevada, alrededor de 17,4 g/kg de peso corporal, lo cual significa que una persona de 80 kg tendría que tomar alrededor de 1,6 l de biodiésel para que tenga efectos mortales. La sal común (NaCl) es aproximadamente diez veces más tóxica. El impacto en la salud humana es un criterio importante cuando se considera la idoneidad de un combustible para aplicaciones comerciales.

En cuanto a la toxicidad acuática, según el National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) de los Estados Unidos, ésta es muy baja. Se requieren concentraciones altísimas en el agua, mayores a 1.000 mg/l, para llegar a niveles letales. Por ello el biodiésel es bastante inofensivo para la fauna acuática.

Además el biodiésel es altamente biodegradable en el agua. En estudios de la Universidad de Idaho se encontró que el biodiésel se degrada a un ritmo muy superior al del diésel convencional e incluso tan rápido como la dextrosa (azúcar). En una prueba en solución acuosa, a los 28 días se había degradado el 95% del biodiésel, mientras que el diésel convencional se había degradado en un 40%. En una segunda prueba, esta vez en ambientes acuáticos, el 87% del biodiésel se degradó en 28 días, mientras que la degradación del diésel sólo fue del orden del 26%.

La mezcla de biodiésel con diésel o con gasolina incrementa la biodegradabilidad del combustible, debido a efectos sinérgicos de «cometabolismo». Así, el tiempo necesario para alcanzar un 50% de biodegradación se reduce de 28 a 22 días en el caso del B5 (mezcla de 5% de biodiésel y 95% de diésel) y de 28 a 16 días en el caso del B20 (Pasqualino *et al.*, 2006). Estos efectos sinérgicos son importantes por dos razones:

- ▶ El biodiésel se comercializa actualmente de manera principal mezclado con diésel, y los riesgos de derrame son los mismos que para el diésel puro.
- ▶ El biodiésel podría ser utilizado como un «acelerador» de la biodegradación en caso de derrames de hidrocarburos en medios acuáticos.

Estas características convierten al biodiésel en el combustible ideal para embarcaciones fluviales, especialmente en zonas acuáticas sensibles y/o protegidas. Los combustibles fósiles están muy relacionados con el tema de la contaminación del agua; desde los derrames petroleros en océanos, pasando por la contaminación del agua del subsuelo debido a los

tanques subterráneos hasta llegar a la contaminación de los lagos y ríos debido a las fugas de combustible de los motores de las embarcaciones. El uso del biodiésel puede ayudar a proteger y mejorar la calidad del agua en diversos ambientes.

Asimismo, el biodiésel es menos tóxico y más biodegradable que el diésel en el suelo. En un estudio realizado recientemente, se encontró que el combustible diésel es tóxico a una concentración de 3% en peso en el suelo, mientras que el biodiésel no muestra toxicidad hasta concentraciones de 12% en peso (esta fue la máxima concentración probada en el estudio). Igualmente, se observó que el biodiésel es más fácilmente degradado por la microbiota del suelo: mientras que 80% del biodiésel fue completamente biodegradado, sólo 61% del diésel lo fue (Lapinskiené *et al.*, 2006). Estas características también señalan al biodiésel como combustible apropiado en zonas agrícolas o rurales donde la contaminación del suelo por derrames es más frecuente.

2.1.3 POSIBLE PRODUCCIÓN LOCAL

El biodiésel puede ser producido localmente a partir de aceites vegetales, grasas animales o de aceites y grasas comestibles usados. Esto ofrece nuevas oportunidades de trabajo a nivel local:

- ▶Agricultores tienen la oportunidad de encontrar nuevos usos a cultivos subutilizados, otorgándoles un valor económico, o en todo caso tienen la posibilidad de desarrollar nuevos cultivos.
- ▶Productores pesqueros y pecuarios tienen un nuevo mercado para los aceites de pescado y las grasas animales.
- ▶Gremios de restaurantes, o empresas recicladoras pueden incursionar en el rubro de la recolección y re-utilización de aceites y grasas comestibles usados para la producción de biodiésel.

Se puede generar un circuito económico local, creando puestos de trabajo tanto en la producción de cultivos como en la transformación del aceite en biodiésel, así como empleos indirectos alrededor de esta industria agroenergética. En algunos casos al reducirse los costos del transporte del combustible se hace posible el establecimiento de industrias en áreas rurales, creando a su vez nuevos empleos. Con la producción local de biodiésel se puede mejorar el nivel de vida en las comunidades rurales, disminuyendo así las migraciones y fijando la población rural en el campo.

Estos temas son de especial importancia en el Perú, donde existen alrededor de un millón 700 mil hogares sin electricidad, de los cuales 350 mil se encontrarían en la Amazonía (INEI, 2005). El biodiésel puede producirse a pequeña y mediana escala, por lo que podría ser una opción para el abastecimiento energético en zonas rurales aisladas, especialmente de la selva amazónica. En estas zonas, el biodiésel podría ser producido a partir de oleaginosas locales, y ser utilizado para abastecer generadores diésel para la producción de electricidad (por ejemplo en pequeños poblados y en alojamientos ecoturísticos) y también para embarcaciones de transporte fluvial, con la ventaja de ser un combustible inofensivo para ambientes acuáticos. En el caso de la Amazonía, también, la producción de oleaginosas puede

establecerse como una alternativa a los cultivos ilícitos, fomentando el empleo legal y el desarrollo local.

Asimismo, en el caso de uso de biodiésel en las minas, la producción de aceite para su elaboración puede constituir una interesante alternativa para los pobladores rurales que viven en zonas aledañas a los emplazamientos mineros.

Es probable que este escenario de producción y uso local de biodiésel no sea muy importante en términos macroeconómicos, pero puede constituir una alternativa interesante para los pequeños grupos posiblemente involucrados, sea en zonas rurales aisladas, territorios aledaños a enclaves mineros, o en casos de reaprovechamiento de aceites o grasas recicladas.

2.1.4 REDUCCIÓN DE LA DEPENDENCIA DEL PETRÓLEO IMPORTADO

El biodiésel puede reducir la dependencia del petróleo importado y contribuir al ahorro de divisas y a la seguridad energética. Como puede ser empleado directamente en motores diésel, el biodiésel tiene un potencial inmediato para reducir la demanda de petróleo.

El Perú es un importador neto de hidrocarburos, especialmente de diésel 2, producto que ocupa el segundo lugar en el ranking de importaciones del país, después del petróleo crudo (INEI, 2005). El Perú en el año 2004 consumió cerca de 23 millones de barriles de diésel 2, de los cuales poco más de 9 millones (casi el 40%) fueron importados (INEI, 2005). En la Figura 2.1 y Figura 2.2 se puede comparar la producción y consumo de gasolinas y diésel 2 en los últimos años, observándose que mientras el Perú produce más gasolina de la que consume (y exporta el excedente), consume más diésel del que produce (y debe importar el faltante).

Figura 2.1: Balance de producción y consumo de diésel 2 en el Perú (años 1997 a 2004)

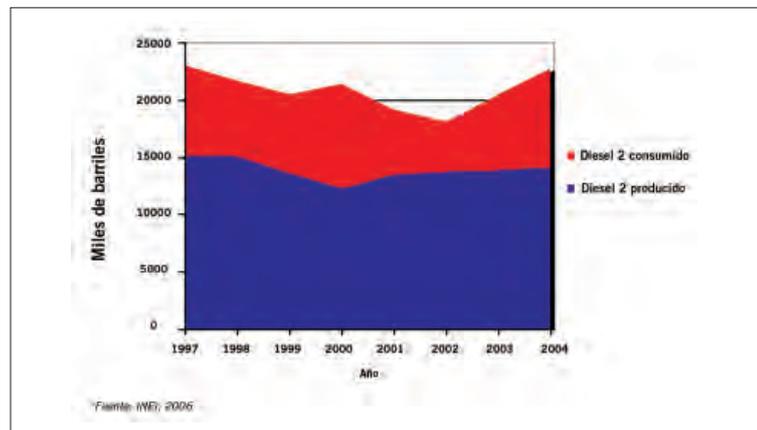
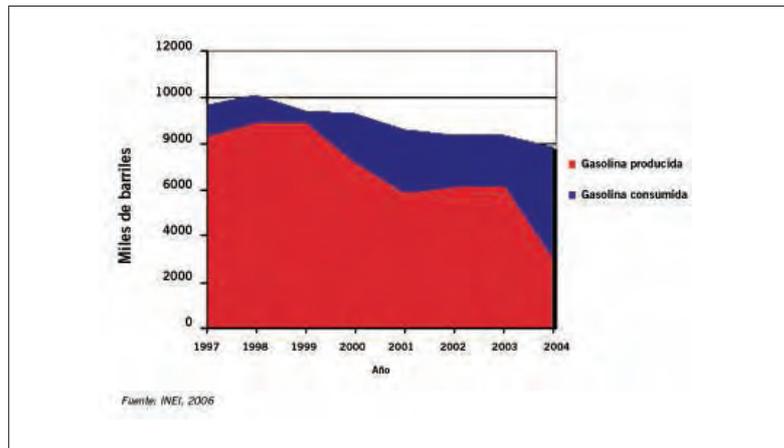
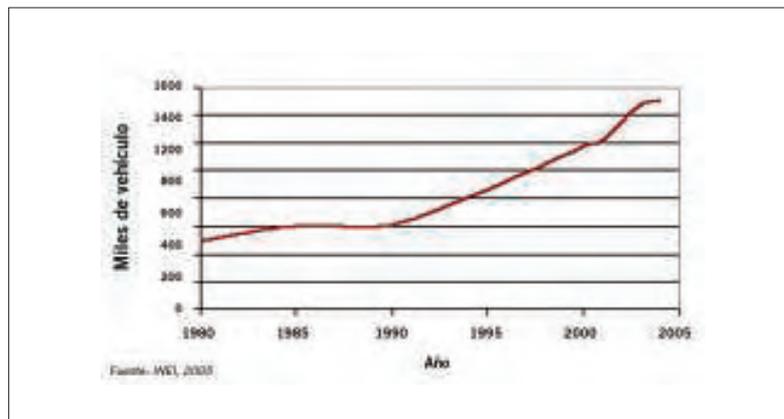


Figura 2.2: Balance de producción y consumo de gasolinas en el Perú (años 1997 a 2004)



Adicionalmente, el parque automotor nacional ha ido incrementándose vertiginosamente en los últimos 25 años (ver Figura 2.3), lo cual es una de las principales razones de esta mayor demanda por combustibles.

Figura 2.3: Crecimiento del parque automotor en el Perú (años 1980 a 2004)



Finalmente, el incremento en los precios del petróleo, y el costo en divisas que esto representa para el país (más de US\$ 420 millones en importación de diésel 2 en el 2004) convierten a la producción local a gran escala de biodiésel en una alternativa atractiva para el país desde el punto de vista macroeconómico.

2.1.5 VENTAJAS TÉCNICAS

El biodiésel tiene propiedades físicas y químicas similares a las del diésel convencional¹⁸ lo que permite su empleo directo en cualquier motor diésel sin necesidad de realizar modificaciones en el motor, el sistema de encendido, o los inyectores de combustible. El biodiésel es, por lo tanto, el único combustible alternativo que puede aprovecharse de manera directa en los equipos existentes, evitando así la necesidad de hacer inversiones en modificaciones o de introducir tecnologías nuevas para su aprovechamiento. Los usuarios pueden consumir el biodiésel utilizando los mismos equipos que normalmente emplean, tales como motores, motobombas, grupos electrógenos u otros.

Asimismo, el biodiésel puede ser bombeado, almacenado, y manipulado usando la misma infraestructura, los mismos equipos, y los mismos procedimientos que normalmente se emplean con el diésel convencional. Para el caso específico del almacenamiento, los tanques más adecuados son los de acero inoxidable, aluminio, polipropileno fluorado, polietileno fluorado, teflón y fibra de vidrio. Se deben evitar los tanques revestidos en concreto, o aleaciones que contengan cobre, plomo, zinc y estaño, pues estos metales pueden catalizar reacciones químicas de degradación del combustible (DOE, 2006).

El biodiésel también se puede utilizar como aditivo del diésel, mezclado en cualquier proporción, dependiendo del costo del combustible y del efecto deseado. La proporción más utilizada (principalmente en los Estados Unidos) es del 20% de biodiésel en 80% de diésel, mezcla a la que se denomina B20; en países como Brasil, se están empleando proporciones que emplean 2% y 5% de biodiésel (denominadas B2 y B5, respectivamente).

El encendido, rendimiento, desgaste, torque y potencia de los motores utilizando biodiésel puro o mezclado es similar al que genera el diésel convencional. El consumo de combustible, en el caso del biodiésel puro, se ve levemente afectado debido a que el biodiésel tiene ligeramente menos poder calorífico que el diésel: 1 litro de diésel derivado del petróleo equivale energéticamente a 1,05 – 1,10 litros de biodiésel.

Una de las ventajas importantes del biodiésel es que prácticamente no contiene sulfuros. Reducir los niveles de sulfuro en los combustibles es necesario para reducir la contaminación atmosférica. Sin embargo, el diésel de petróleo bajo en azufre tiene una muy baja lubricidad. Dado que el biodiésel tiene poco azufre y alta lubricidad, su uso en mezclas puede mejorar notablemente la lubricidad del diésel, alargando la vida del motor y mejorando las emisiones.

El uso del biodiésel ayuda a extender la vida de los motores; utilizándolo en mezclas, mejora notablemente la lubricidad del diésel convencional.

Por otra parte, el punto de inflamación del biodiésel se encuentra cercano a los 130°C. Al tener un punto de inflamación elevado, y además al no producir vapores explosivos, el biodiésel es mucho más seguro de operar, transportar y almacenar que el diésel convencional, aún utilizando la misma infraestructura y los mismos procedimientos para la manipulación y almacenaje.

¹⁸ Ver Capítulo 6 para más detalles.

2.2 POSIBLES BARRERAS AL DESARROLLO DEL BIODIÉSEL

2.2.1 INCREMENTO DE LAS EMISIONES DE NOx

A diferencia de la mayoría de contaminantes atmosféricos, la emisión de óxidos de nitrógeno (NOx) se incrementa con el uso del biodiésel: en un 13% en todo su ciclo de vida y un 9% durante la combustión (Sheehan *et al.*, 1998) (ver Tabla 2.1 presentada anteriormente). La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos en un estudio que compila datos de diversas investigaciones (EPA, 2002) encontró que las emisiones vehiculares de NOx se incrementan en un 10% con el biodiésel respecto del diésel, concordando con el estudio anterior. Otros estudios con diferentes motores han encontrado incrementos en la emisión de NOx de entre 9,9% y 19,6% (Morris *et al.*, 2003).

Estudios recientes en el NREL de los Estados Unidos mostraron que las emisiones de NOx varían considerablemente según la materia prima del biodiésel, pero en todos los casos ellas fueron mayores que con diésel. Se encontró que a mayor grado de insaturación de las materias primas para biodiésel (por ejemplo, colza canola y soya), se producían mayores emisiones de NOx. Mediante un análisis de regresión, se encontró que las emisiones de NOx podían ser correlacionadas con el número de cetano o con la densidad del biodiésel (asimismo, el número de cetano y la densidad están altamente relacionados, pues ambos dependen del grado de saturación de los ácidos grasos en el combustible). Los resultados sugieren que cualquier biodiésel con un número de cetano mayor a 68 podría producir emisiones de NOx iguales o menores que las del diésel. Asimismo, mostraron que el biodiésel con ésteres de cadena más corta produce mayores emisiones de NOx que biodiésel con ésteres de cadena más larga (Graboski *et al.*, 2003).

Este es uno de los puntos a solucionar, tanto en el diseño de motores como en la formulación del biodiésel. Existen nuevas tecnologías, como los sistemas de recirculación de gases de escape, que son efectivas para reducir la emisión de NOx, pero que incrementan la emisión de material particulado e hidrocarburos no quemados en sistemas diésel. En el caso del biodiésel, como el material particulado y los hidrocarburos emitidos se reducen, el uso de estos sistemas de recirculación de gases permitiría reducir las emisiones de NOx manteniendo también menores emisiones de PM y HC sin afectar la eficiencia de combustión (Agarwal *et al.*, 2006).

El principal problema de los NOx es que no sólo aumentan la contaminación atmosférica a nivel de la tropósfera (generando *smog* en las ciudades, contribuyendo a la lluvia ácida y causando problemas de salud pública), sino que además el óxido nitroso (N₂O) emitido en la etapa agrícola de la producción de biodiésel debido al uso de fertilizantes nitrogenados, *destruye la capa de ozono*¹⁹ y también es un *gas de efecto invernadero* con un efecto 310 veces mayor que el del CO₂²⁰ (Friedrich, 2004).

¹⁹ La capa de ozono es una zona de la atmósfera, ubicada en la estratósfera, que funciona como un filtro para los rayos ultravioleta del sol, que pueden causar cáncer de piel, daños a la vista; entre otros problemas de salud.

²⁰ Es decir, que una molécula de N₂O retiene la misma cantidad de calor que 310 moléculas de CO₂.

2.2.2 CAMBIOS EN EL USO DEL SUELO: DEFORESTACIÓN Y PÉRDIDA DE BIODIVERSIDAD

La producción de biodiésel también tiene – o puede tener – otros impactos ambientales negativos que cuestionen su naturaleza *renovable, limpia y sostenible*.

Las materias primas vegetales más viables económicamente son aquellas que tienen grandes contenidos de energía, altos rendimientos por hectárea y requieren poco procesamiento, tales como la caña de azúcar (para el caso del etanol) y la palma aceitera para el biodiésel. Dado que estos cultivos son de áreas tropicales, los países en desarrollo están siendo favorecidos como áreas de producción de estas materias primas para biocombustibles. Sin embargo, inmensas cantidades de materia prima son necesarias para reemplazar incluso una pequeña fracción del combustible utilizado para el transporte en el mundo. Por esto, se requieren vastas áreas de terreno para satisfacer la creciente demanda por biocombustibles, y la controvertida elección está entre reemplazar tierra agrícola para producir biocombustibles, o transformar áreas naturales para instalar cultivos energéticos. El reemplazo de la tierra agrícola reduce el terreno disponible para producción de alimentos, y la conversión de áreas naturales – principalmente bosques – afecta recursos naturales tales como madera, agua, suelo y biodiversidad (PANOS, 2006).

Ya se ha generado una fuerte presión sobre las selvas tropicales por la instalación de cultivos oleaginosos para biodiésel. Este problema se ha sentido de manera más crítica hasta el momento en Malasia e Indonesia, donde se han devastado amplias zonas de bosque para la instalación de plantaciones de palma aceitera africana. De las áreas bajo monocultivo de palma, actualmente estimadas en alrededor de 10,5 millones de hectáreas (Abdullah, 2003; Forest Peoples Programme, 2006), casi la mitad implicó algún tipo de destrucción del bosque, según cifras de la industria local del 2002 (Friends of the Earth, 2005).

Además, vastas extensiones han sido afectadas por incendios forestales causados durante el clearo de tierras para la agricultura. Según el CIFOR, sólo en 1997-98 alrededor de 11,7 millones de hectáreas de tierra fueron afectadas por incendios, la mitad de las cuales eran bosques (Tacconi, 2003). Entre 46 y 80% de estos incendios se iniciaron en concesiones de plantaciones, principalmente de palma, y muy probablemente fueron causadas accidental o intencionalmente por las compañías concesionarias (Vayda, 1998; Schweithelm, 1999). En este caso, no sólo la biodiversidad y los recursos del bosque se ven afectados, sino también el clima mundial, ya que durante estos incendios forestales se emiten inmensas cantidades de CO₂ a la atmósfera (durante 1997-98 las emisiones durante estos incendios fueron equivalentes al 40% de las emisiones producidas por la combustión de combustibles fósiles en todo el mundo – PANOS, 2006). Entonces, lo que se pudiera haber reducido en emisiones de CO₂ al reemplazar el diésel por biodiésel, se emite con creces con la destrucción de los bosques.

Este es también un peligro latente en la Amazonía brasilera por la expansión del cultivo de soya y palma aceitera para biodiésel. En países como Colombia, se discute aún la conveniencia, o no, de reemplazar extensas áreas de las sabanas de la Orinoquia por monocultivo de palma aceitera africana. Estos análisis y discusiones son totalmente pertinentes en el Perú, considerando el millón 400 mil hectáreas que según cifras oficiales

tendrían potencial para la instalación de palma aceitera africana en la megadiversa selva Amazónica peruana.

Como peligro adicional, el mercado favorece la expansión de estos cultivos oleaginosos para la producción de biodiésel en zonas tropicales. Los cultivos de zonas tropicales rinden más por hectárea, y la tierra y mano de obra son más baratas, por lo que el aceite resultante es también más barato que el producido en zonas templadas. Además, la regulación sobre protección de bosques o zonas frágiles es débil o no suficientemente aplicada en estos países, debido a deficiencias de personal, presupuestales, o ambas.

Finalmente, los países desarrollados, que son los que están estableciendo metas de consumo de biocombustibles con fines ambientales, principalmente de reducción de emisiones de efecto invernadero, no podrían frenar de manera efectiva el ingreso de este tipo de biodiésel destructor de bosques a sus mercados: una prohibición del ingreso de biocombustibles debido a criterios ambientales estaría infringiendo las normas internacionales de comercio (Monbiot, 2006). Es decir, que la creación de cuotas de biocombustibles en Europa estaría generando una demanda que, de no tomarse otras medidas regulatorias, sería cubierta en gran medida por etanol procedente de Brasil y biodiésel del Sudeste Asiático (que son mucho más baratos que los biocombustibles producidos en la misma Europa), y que en lugar de ayudar a prevenir el cambio climático lo podrían estar intensificando.

En el caso de la selva amazónica, uno de los puntos en los que se requiere mayor investigación es el referido al potencial de las especies oleaginosas nativas, las mismas que, casi por definición, están más adaptadas a las condiciones específicas de la región y suelen ser menos exigentes en cuanto al uso de insumos externos. En una situación ideal de investigación, promoción y manejo apropiado de especies oleaginosas amazónicas para la producción de biodiésel, podrían implicar un enriquecimiento del bosque, antes que su desaparición.

2.3 TEMAS AÚN EN DEBATE

2.3.1 SISTEMAS DE PRODUCCIÓN AGRÍCOLA

Muchos de los aspectos más discutidos sobre el biodiésel dependen básicamente del sistema de producción agrícola utilizado para obtener la materia prima oleaginosa. Defensores del biodiésel afirman que su principal ventaja es ayudar a reducir las emisiones de dióxido de carbono que contribuyen al calentamiento global, ya que el CO₂ emitido durante su combustión habría sido previamente tomado por las plantas de la atmósfera mediante la fotosíntesis. Sus detractores argumentan, en cambio, que el biodiésel produce más gases de efecto invernadero, principalmente debido a la fertilización utilizada durante la fase agrícola (el uso de fertilizantes nitrogenados contribuye a la emisión de N₂O, gas que retiene 310 veces más calor que el CO₂), y debido a los cambios en el uso del suelo (tema que explicamos más arriba). Igualmente sucede con el balance energético: los defensores del biodiésel señalan que su balance energético es positivo y que su uso permite ahorrar combustibles fósiles (balance

de energía fósil positivo: se utilizan menos combustibles fósiles que la energía final generada), mientras que los detractores afirman lo contrario. Finalmente, también dependiendo de los sistemas de producción agrícola, los críticos de los biocombustibles señalan la problemática social – debido al tráfico de tierras – y problemas de contaminación de agua y suelo.

En los siguientes párrafos vamos a detallar las ideas centrales de estos argumentos, tanto a favor, como en contra, de la producción y uso de biodiésel.

BALANCE DE GASES DE EFECTO INVERNADERO

El beneficio del biodiésel que mayores debates genera, debido a las numerosas evaluaciones contradictorias que se han realizado, es el referido a las emisiones de gases de efecto invernadero. Diversos estudios han indicado que el biodiésel emite menos CO₂ en su ciclo de vida que el fijado mediante el proceso de fotosíntesis por los vegetales oleaginosos usados para producirlo (Fernández, 1998; Sheehan *et al.*, 1998; Kim y Dale, 2005; Frondel y Peters, 2006; Ryan *et al.*, 2006).

Sin embargo, la estimación de balances de energía y de gases invernadero para los biocombustibles es compleja. Aunque la combustión del biodiésel se considera neutral en términos de CO₂ (IPCC, 1996), su producción puede requerir insumos o procesos que pueden distorsionar este balance. Por ejemplo el uso de fertilizantes nitrogenados puede ocasionar la emisión de N₂O a la atmósfera. Según la IEA (2001), este gas retiene 310 veces más calor que el CO₂, contribuyendo al cambio climático, y además afecta a la capa de ozono.

El balance final de gases de efecto invernadero depende del vegetal cultivado, el sistema de producción, el rendimiento por hectárea, los insumos utilizados, y el grado de aprovechamiento de los residuos de producción (por ejemplo como combustibles en el proceso de transformación, o como alimento para ganado) (Ryan *et al.*, 2006). En la Tabla 2.2 se puede observar una comparación de diferentes estudios de balance de gases de efecto invernadero para la producción de biodiésel.

Todos estos estudios indican que sí se produce un ahorro de emisiones de gases de efecto invernadero si se sustituye diésel por biodiésel, pero este ahorro no es del 100%. Cabe notar, además, que estos estudios se centran básicamente en producción de soya en Estados Unidos y colza en la Unión Europea. No hay estudios (de libre acceso, es decir) sobre balances de gases de efecto invernadero para el biodiésel producido con aceite de palma en Malasia o Indonesia, por ejemplo, donde existen sospechas de que los sistemas agrícolas de producción son menos sostenibles.

Balance energético

De acuerdo con Janulis (2004), en el análisis de ciclo de vida del biodiésel se pueden calcular, fundamentalmente, dos tipos de indicadores energéticos:

- ▶R1: el ratio entre la energía contenida en el biodiésel y la energía total utilizada en su producción.
- ▶R2: el ratio entre la energía contenida en el biodiésel y los subproductos de su producción (paja, torta de extracción, glicerina) y la energía total utilizada en su producción.

Tabla 2.2: Balance de gases de efecto invernadero de la producción de biodiésel según diversos estudios

Cultivo	País	Ahorro de emisiones de efecto invernadero	Supuestos	Fuente
Colza	Alemania	Aproximadamente 2,2 kg CO ₂ equivalente / litro biodiésel usado	Se asume producción de miel de las flores de colza, y se valora su energía. Se asume que la harina de colza se usa como alimento animal, sustituyendo harina de soya importada. Se asume que la producción de colza reemplaza tierras en descanso. La paja de la colza es reincorporada al suelo.	Gärtner y Reinhardt, 2003
Girasol	España	13 kg CO ₂ / litro diésel sustituido	Se considera que 1 litro de diésel equivale a 1,1 litros de biodiésel.	Fernández, 1998
Soya	Estados Unidos	0,885 Mg CO ₂ equivalente ²¹ / ha / año	Sistema de rotación soya-maíz, donde el maíz se usa para etanol y la soya para biodiésel. Se considera la energía de ambos productos.	Kim y Dale, 2005
Soya	Estados Unidos	78% de ahorro de emisiones de CO ₂	Se consideran emisiones de origen fósil.	Sheehan <i>et al.</i> , 1998
Varios	Varios	25 a 80% de ahorro de emisiones de CO ₂	Comparación de diferentes estudios de ciclo de vida del biodiésel en la Unión Europea y Estados Unidos, desde la década de los años 80 hasta la década de los años 90. Resultados dependen de conocimientos y tecnología disponibles en cada momento, así como de supuestos de cada estudio.	Wörgetter <i>et al.</i> , 1999
Varios	Europa	41 a 78% de ahorro de emisiones de todos los gases de efecto invernadero	Comparación de diferentes estudios previos.	Frondel y Peters, 2006
Varios	Europa	17 a 64% (valor más probable 46%) de ahorro de emisiones de efecto invernadero respecto al uso del diésel	Utilizando semillas oleaginosas producidas en Europa como materia prima. La estimación más probable se determinó considerando un uso realista de sub-productos del proceso. Se consideran todos los gases de efecto invernadero.	Jungmeier <i>et al.</i> , 2005, citados por Ryan <i>et al.</i> , 2006

Si R1 es menor a 1, la cantidad de energía fósil utilizada en producir el biodiésel es mayor a la obtenida de su uso, y el combustible puede considerarse no renovable.

²¹ Las unidades de CO₂ equivalente se refieren a las emisiones de todos los gases de efecto invernadero, pero expresados en su equivalente de CO₂ para permitir la comparación.

Todos estos indicadores energéticos dependen de las condiciones climáticas y las tecnologías agrícolas y de procesamiento utilizadas, por lo que los balances energéticos para el biodiésel variarán de país a país.

En la Tabla 2.3 se presenta una comparación entre diferentes estudios que han realizado balances energéticos de la producción de biodiésel bajo diversas condiciones. Se puede observar que en la mayoría de los casos el balance obtenido es positivo (ratio mayor a 1, tanto para R1 como para R2). Sin embargo existen casos en los que el balance es negativo, es decir, el consumo de energía utilizado en la producción del biodiésel sería mayor que la energía generada por este biocombustible.

Tabla 2.3: Balance energético de la producción de biodiésel según diferentes estudios

Cultivo	País	Balance energético(ratio energía biodiésel / energía total consumida en su obtención)	Supuestos	Fuente
Colza	Unión Europea	1,9	Sólo se considera energía del biodiésel.	NTB Liquid Biofuels Network, 2000, citado por Janulis, 2004
Colza	Alemania	Para recorrer 100 km, se ahorra la energía necesaria para producir 8 litros de diésel.	Se asume producción de miel de las flores de colza, y se valora su energía. Se asume que la harina de colza se usa como alimento animal, sustituyendo harina de soya importada. Se asume que la producción de colza reemplaza tierras en descanso. La paja de la colza es reincorporada al suelo.	Gärtner y Reinhardt, 2003
Colza	Francia	2,6 a 5,4	Incluye energía obtenida de los subproductos del proceso. Variabilidad según se incluya la energía de la paja (ratio más alto) o no.	ADEME, 1997, citado por Janulis, 2004
Colza	Lituania	1,04 a 1,66	Sólo se considera energía del biodiésel, con 2 t/ha de rendimiento agrícola. Variabilidad según sistema agrícola (mejor rendimiento con tecnologías de conservación y biofertilizantes).	Janulis, 2004
Colza	Lituania	1,76 a 6,08	Incluye energía obtenida de los subproductos del proceso, con 2 t/ha de rendimiento agrícola. Variabilidad según se incluya la energía de la paja y se usen tecnologías de conservación y biofertilizantes (ratio más alto) o no.	Janulis, 2004
Colza	Lituania	1,59 a 2,54	Sólo se considera energía del biodiésel, con 3,5 t/ha de rendimiento agrícola. Variabilidad según sistema agrícola (mejor rendimiento con tecnologías de conservación y biofertilizantes).	Janulis, 2004

OPCIONES PARA LA PRODUCCIÓN Y USO DE BIODIÉSEL EN EL PERÚ

Cultivo	País	Balance energético...	Supuestos	Fuente
Colza	Lituania	5,81 a 9,29	Incluye energía obtenida de los subproductos del proceso (incluyendo paja), con 3,5 t/ha de rendimiento agrícola. Variabilidad según sistema agrícola (mejor rendimiento con tecnologías de conservación y biofertilizantes).	Janulis, 2004
Girasol	Estados Unidos	0,46 a 0,57	Variabilidad según se considera valor energético de subproducto (harina de girasol) en forma de su calor específico.	Pimentel y Patzek, 2005
Soya	Estados Unidos	3,215	Ratio entre energía del biodiésel y energía fósil utilizada en producirlo.	Sheehan <i>et al.</i> , 1988, citados por Janulis, 2004
Soya	Estados Unidos	0,76 a 0,94	Variabilidad según se considera valor energético de subproducto (harina de soya) en forma de su calor específico.	Pimentel y Patzek, 2005
Soya	Estados Unidos	Ahorro: 19,25 GJ de energía no renovable/ha/año	Sistema de rotación soya-maíz, donde el maíz se usa para etanol y la soya para biodiésel. Se considera la energía de ambos productos.	Kim y Dale, 2005
Sebo de vaca	Estados Unidos	0,81 a 0,89	Se considera desde el crecimiento del animal, el beneficio y la transformación en biodiésel. Sólo se considera el consumo energético del crecimiento del animal correspondiente al % en peso de la grasa respecto del total de productos obtenidos. Variabilidad depende de cómo se calcule el valor energético de los subproductos (según su valor calorífico, según su valor económico, o según su valor de reemplazo de otros productos similares).	Nelson y Schrock, 2006
Sebo de vaca	Estados Unidos	3,49 a 5,72	Se considera consumo energético desde el procesamiento de la grasa animal en sebo hasta la transformación en biodiésel. Variabilidad depende de cómo se calcule el valor energético de los subproductos.	Nelson y Schrock, 2006
Sebo de vaca	Estados Unidos	5,9 a 17,29	Se considera consumo energético sólo de la transformación de la grasa en biodiésel, asumiendo que esta grasa está disponible como subproducto de la producción cárnica. Variabilidad depende de cómo se calcule el valor energético de los subproductos.	Nelson y Schrock, 2006
Varios	Varios	2 a 3	Ratio de energía del biodiésel / energía fósil utilizada en su producción. Comparación de diferentes estudios de ciclo de vida del biodiésel en la Unión Europea y Estados Unidos, desde la década de los años 80.	Wörgetter <i>et al.</i> , 1999

CONTAMINACIÓN DE AGUAS Y SUELOS

El uso de fertilizantes en los cultivos de oleaginosas tiene como impactos la eutrofización²² de cursos de agua y la acidificación de suelos, así como la destrucción de la capa de ozono. La magnitud de estos impactos depende fuertemente de los sistemas agrícolas utilizados. Existe un estudio que hace un esfuerzo por cuantificar estos problemas, y sus resultados se presentan en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4: Contaminación de aguas y suelos generada por la producción de biodiésel

Cultivo	País	Acidificación	Eutrofización	Observaciones/ comentarios	Fuente
Soya	Estados Unidos	+1388 moles H+ equivalente / ha / año de acidificación por emisiones de NOx, SOx, etc.	+1 kg N equivalente / ha / año de eutrofización por emisiones de N y P.	Sistema de rotación soya-maíz, donde el maíz se usa para etanol y la soya para biodiésel. Se considera la energía de ambos productos	Kim y Dale, 2005

Es difícil cuantificar los posibles aspectos negativos del biodiésel y encontrar un balance con los aspectos positivos. Si se evita la deforestación masiva de bosques tropicales para el establecimiento de cultivos oleaginosos, los aspectos positivos de la producción de biodiésel seguirán siendo más importantes que los negativos. Sin embargo, se debe recordar que el biodiésel es una solución parcial, que los niveles de producción nunca alcanzarán a cubrir la demanda de combustibles para transporte, y que hay otras maneras, aún más atractivas económicamente, de reducir el consumo de petróleo y las emisiones de gases de efecto invernadero (Fronzel y Peters, 2006; Ryan *et al.*, 2006).

2.3.2 LÍMITES DE LA OFERTA DE MATERIA PRIMA

Es necesario tener cautela respecto a la expansión del mercado del biodiésel. Los aceites vegetales requieren terreno agrícola para su producción, bastante escaso en muchas partes del mundo, cuya creación puede impactar en ecosistemas naturales frágiles y en la seguridad alimentaria de la humanidad, especialmente en los países más pobres.

Incluso el subdirector general de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), Alexander Mueller, ha señalado recientemente que «*existe un*

²² Se refiere al incremento de sustancias nutritivas en aguas dulces de lagos y embalses, que provoca un exceso de fitoplancton.

enorme potencial para los biocombustibles pero debemos mirar a la competencia con la producción de alimentos. La creciente producción de biocombustibles de cultivos podría complicar las metas de las Naciones Unidas de acabar con el hambre en los países en desarrollo, donde 850 millones de personas no tienen lo suficiente para comer». En el caso del Perú, este tema es particularmente delicado, ya que importamos del 50 al 60% del aceite destinado para consumo humano.

El biodiésel, por lo tanto, nunca podrá llegar a reemplazar a una proporción alta del combustible fósil utilizado en la actualidad, debido a la limitada disponibilidad de tierras para la producción de oleaginosas. Por ejemplo para el caso de los Estados Unidos, si todo el aceite vegetal y grasa animal disponible en ese país se utilizara para producir biodiésel, sólo se podría reemplazar alrededor del 15% de su demanda actual de diésel para transporte (Iowa State University, 2004). Por lo tanto, la posible contribución del biodiésel a mejorar la sustentabilidad del sistema energético es limitada (Friedrich, 2004).

Otro recurso limitado, pero de importante consideración cuando se analicen posibles producciones de cultivos oleaginosos para producción de biodiésel, es el agua. En países como el Perú, al margen de la posible producción de palma africana en la selva tropical, los demás cultivos en costa o sierra, muy probablemente requieran de sistemas de riego. En áreas relativamente pequeñas o medianas, puede ser un tema relativamente manejable, pero cuando son miles o cientos de miles las hectáreas que se piensen incorporar para la producción agrícola, es necesario no perder de vista la disponibilidad (o no) de este escaso recurso. En este sentido, una opción a evaluar, de manera complementaria, dados los fines «no alimenticios» de estos cultivos, podría ser el uso de aguas residuales, las cuales, en vez de ser vertidas sin mayor tratamiento a ríos y cursos de agua, podrían reaprovecharse casi directamente en el riego de estos cultivos energéticos.

2.3.3 ¿BIODIÉSEL O ACEITES NATURALES?

Retomando la idea original de Rudolf Diesel de aprovechar los aceites vegetales como combustibles para los motores de combustión interna, cabría preguntarse entonces ¿por qué transformar los aceites en biodiésel si es que podrían utilizarse directamente en los motores? Ensayaremos dos posibles respuestas a esta interrogante:

En primer lugar, prácticamente todo el desarrollo de los motores diésel se basó en el uso de combustible derivado del petróleo, por lo que, en la actualidad, los aceites vegetales sólo pueden ser empleados como combustible para motores de combustión interna en aquellos motores diésel de inyección indirecta con precámara de inyección. Estos motores son apropiados para usarse con los aceites directamente, además tienen una combustión más completa, pero su rendimiento es menor y son más costosos. En cambio, los aceites vegetales no resultan adecuados en los motores diésel más comunes (sin precámara) ya que originan problemas en el sistema de inyección y perjuicios por la aparición de residuos carbonosos, debido a su alta viscosidad. Algunos de los problemas observados con el uso directo de

aceites en motores son (Meher *et al.*, 2006; Bozbas, 2006):

- ▶ Formación de depósitos y taponamiento de los inyectores a tal nivel que la atomización del combustible no es apropiada o no se realiza debido a orificios bloqueados.
- ▶ Depósitos de carbón en los pistones y la cabecera del motor.
- ▶ Degradación y/o pegado de los anillos.
- ▶ Espesamiento o gelificación del aceite lubricante por contaminación con el aceite vegetal.
- ▶ Problemas de lubricación.

Estos problemas están relacionados con el mayor tamaño molecular de los triglicéridos y su mayor masa molecular, especialmente en el caso de las grasas animales, los cuales causan una mayor viscosidad (entre 11 y 17 veces mayor a la del diésel) y una menor volatilidad, que lleva a una combustión incompleta y la formación de depósitos (Meher *et al.*, 2006). Las impurezas presentes en los aceites (gomas naturales y cenizas) también ocasionan el taponamiento de filtros, líneas e inyectores (Bozbas, 2006). Esta situación podría superarse realizando algunas modificaciones al motor, como por ejemplo el calentamiento previo de los conductos de combustible (para reducir su viscosidad), y la instalación de dos tanques de combustible, para poder utilizar diésel cuando el motor arranca y funciona a carga parcial, y aceite el resto del tiempo. También es necesario asegurar que el aceite haya sido parcialmente refinado y filtrado para retirar las gommas e impurezas.

Sin embargo, y este es el segundo argumento, subsisten aún algunas dudas sobre las emisiones que se producen en la combustión del aceite no transesterificado. Si esta combustión no se realiza a temperaturas suficientemente altas, la glicerina que contiene el aceite en su composición genera acroleína, gas tóxico, irritante y, posiblemente, cancerígeno. Este problema no se presenta en la combustión del biodiésel, ya que este biocombustible prácticamente no contiene glicerina. Si bien no termina de haber consenso en el ámbito académico y científico sobre los factores que condicionarían la aparición de la acroleína, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, por ejemplo, ha tipificado como una violación de la Ley de Aire Limpio el uso del aceite vegetal como combustible automotor. En el Perú, por nuestra parte, se viene ensayando desde el año 2006 un proyecto piloto de sustitución de diésel por aceites vegetales naturales en la flota de una empresa de transporte público urbano de Lima.

2.3.4 AUTOCONSUMO EN ZONAS AISLADAS

Si bien la posible producción local se presentó como uno de los argumentos que podría alentar la promoción de este biocombustible, es necesario tener en cuenta que para la elaboración de biodiésel es necesario, además, disponer de metanol o etanol anhidro. En algunas zonas aisladas esto puede ser un problema: el transporte del metanol implica algunos riesgos por su naturaleza inflamable, además de ser, en el Perú, un líquido

controlado ya suele ser utilizado en la adulteración de licores; la alternativa más atractiva del etanol producido localmente, requiere ser complementada con un proceso de deshidratación (es necesario llevar el etanol a un grado de pureza superior al 99,6%) y esto puede implicar inversiones importantes adicionales.

Entonces, en caso que no se disponga de metanol o etanol anhidro en zonas de producción de oleaginosas, es probable que las iniciativas tengan que centrarse en la venta de aceite para la producción de biodiésel en otras regiones, antes que en la producción local del biocombustible.

2.4 EN PERSPECTIVA

Como hemos visto en los puntos anteriores, el biodiésel puede presentar muy interesantes ventajas, y también algunos importantes puntos en contra, pero, sobre todo, una serie de aspectos en los cuales aún no termina de haber consenso, ni académico, ni comercial. Y, en el contexto del reciente *boom* por los biocombustibles, puede ser difícil encontrar argumentos objetivos y con independencia de las partes involucradas.

Por el momento, a la pregunta sobre la conveniencia o inconveniencia de la producción y uso de biodiésel, solo se puede asegurar una incertidumbre y más preguntas: *depende de dónde, de cómo, y para qué*. En el siguiente capítulo intentaremos aproximarnos un poco más a estas posibles conveniencias o inconveniencias para el caso específico del Perú (ver Punto 3.2).

SITUACIÓN ACTUAL DEL BIODIÉSEL EN EL MUNDO Y EN EL PERÚ

En este capítulo exploraremos la situación actual del biodiésel en el mundo y en Perú. Respecto a la situación mundial, se analizarán los principales países y regiones productoras y el contexto que impulsó el desarrollo del biodiésel en dichas zonas; así como el tema de precios actuales de este biocombustible. Sobre la situación en el Perú, se hará un repaso a los avances realizados hasta la fecha, tanto en el ámbito legal, como académico y comercial.

3.1 EL BIODIÉSEL EN EL MUNDO

3.1.1 ¿CUÁNTO Y DÓNDE?

Según el F.O. Licht's World Ethanol & Biofuels Report, la producción de biodiésel en el mundo en el 2005 habría superado los 3 mil 500 millones de litros, siendo Alemania el principal productor con 1.920 millones de litros, seguido de Francia (511 millones), Estados Unidos (290 millones), Italia (227 millones) y Austria (83 millones) (ver Tabla 3.1).

Tabla 3.1: Principales productores de biodiésel en el mundo

País	Año	Producción (Millones litros/año)	Insumos utilizados	Tipo de uso ²³
Alemania	2005	1.920	Colza, girasol, y/o aceite de cocina reciclado.	Uso puro en todo tipo de vehículos ²⁴ .
Francia	2005	511	Colza, girasol, y/o aceite de cocina reciclado.	Mezcla en el diésel: sin etiquetado para uso general (B2) y en flotas cautivas (B30). 10 a 15 millones de automóviles usan B2 en Francia.
Estados Unidos	2005	290	Más del 90% proviene de soya, el resto de grasa amarilla, otros aceites o grasas animales.	B100, B20 y B2 principalmente en flotas cautivas, pero también venta al público y uso en minas subterráneas (por motivos de salud ocupacional).
Italia	2005	227	Girasol y/o aceite de cocina reciclado.	90% del biodiésel se usa puro o mezclado con 20% de diésel fósil, para usos térmicos como calefacción. Inicios en uso para transporte, especialmente flotas cautivas.
China	2004	138	Colza, semilla de algodón, aceite de cocina reciclado.	Exportado a Hong Kong, uso principal en flotas cautivas.
República Checa	2002	63	Colza, girasol, y/o aceite de cocina reciclado.	Mezcla de diésel con 30% a 40% de biodiésel.
Australia	2004	36	Aceite de cocina reciclado, grasas animales.	
Austria	2005	30	Colza y/o aceite de cocina reciclado.	Mezcla de biodiésel de colza con diésel, o biodiésel puro de aceite de fritura ²⁴ .
España	2002	7	Girasol, aceite de cocina reciclado.	Flotas cautivas.
Dinamarca	2002	5	Colza, girasol, y/o aceite de cocina reciclado.	
Reino Unido	2002	5	Principalmente aceite de cocina reciclado, también colza.	Venta directa a flotas o en algunas estaciones de servicio. Promoción del B5.
Suecia	2002	3	Colza.	Flotas cautivas ²⁴ .
Suiza	2002	1	Principalmente colza.	Uso en cooperativas agrícolas y como B100 en pocas estaciones de servicio.
Eslovaquia	2002	1	Colza, girasol, y/o aceite de cocina reciclado.	Mezcla de diésel con 30% a 40% de biodiésel.

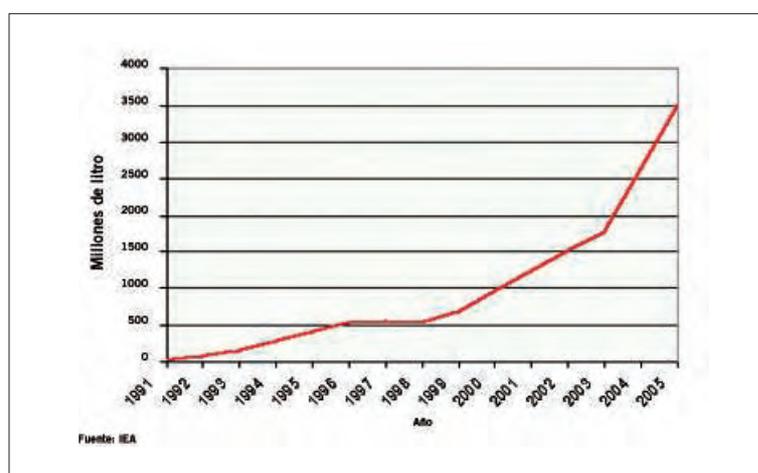
Fuentes: F.O. Licht's World Ethanol & Biofuels Report (2005), Friedrich (2004), Austrian Biofuels Institute (citado por Friedrich, 2004)

²³ Bx se refiere a la proporción (x%) de mezcla de biodiésel (B) en diésel convencional. Por ejemplo, B2 hará referencia a una mezcla de 2% de biodiésel en 98% de diésel.

²⁴ Más de 400 mil vehículos usan B100 (es decir, biodiésel puro) en Alemania, Austria y Suecia.

La producción de biodiésel ha tenido un crecimiento espectacular en los últimos años (ver Figura 3.1). Entre el 2000 y el 2005, ésta se ha cuadruplicado, mientras que la producción de bioetanol sólo creció al doble y la de petróleo sólo creció un 7%. Sin embargo, aún se está lejos de los niveles de producción mundial de bioetanol, que ya superó los 35 mil millones de litros por año.

Figura 3.1: Producción mundial de biodiésel (1991 a 2005)



Varios gobiernos, no obstante, han anunciado metas ambiciosas de producción de biodiésel en sus países, entre los que destacan Malasia (450 millones de litros/año de biodiésel de palma hacia el 2007), Brasil (2.000 millones de litros/año de biodiésel, principalmente de palma, ricino y soya, hacia el 2012), India (4.500 millones de litros/año de biodiésel de piñón) e Indonesia (4.700 millones de litros/año de biodiésel de palma hasta el 2025).

3.1.2 ¿POR QUÉ Y CÓMO?

Los principales motivos que llevaron a los diferentes países a impulsar la producción de biodiésel han sido (Friedrich, 2004):

- ▶Una mayor seguridad en el abastecimiento energético.
- ▶La reducción de la dependencia de fuentes de energía fósiles.
- ▶La reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero.
- ▶La reducción de emisiones dañinas de efecto local.
- ▶La protección del suelo mediante el uso de productos biodegradables.
- ▶La reducción de peligros a la salud mediante el uso de productos no tóxicos.
- ▶La minimización de los excedentes de la producción agraria.

Como se puede observar, todas estas razones están directamente relacionadas con las ventajas del biodiésel explicadas en el capítulo anterior. Ellas se relacionan también con los tipos de medidas regulatorias y de fomento que han implementado los gobiernos para alcanzar estas metas, tal como se puede apreciar en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2: Motivos para la regulación y sus medidas de implementación en diferentes países

Motivo	Territorio	Medida legal
Seguridad del abastecimiento energético	Estados Unidos	Vehículos con combustibles alternativos / EPAct.
	Unión Europea	Cuota obligatoria de 2% y 5% del mercado de combustibles.
Reducción de emisiones dañinas	Estados Unidos	Ley del Aire Limpio. Programa de Ciudades Limpias.
	Italia	Programa de Ciudades Limpias.
Salud ocupacional	Estados Unidos	Minería subterránea: límites de emisiones.
	Alemania	Montacargas en interiores.
	Austria	Trabajo en túneles: límites de emisiones.
Protección del suelo	Austria Holanda	Regulación sobre la lubricación de motosierras. Mayor depreciación de equipos.
Protección del agua	Alemania, Austria, Suiza	Comisión para el Tráfico Internacional de Barcos en el Lago Constanza: límites.
Protección del clima	Alemania	Sistema de impuestos ecológicos.
Minimización de excedentes agrarios	Unión Europea	Política de tierras puestas en descanso y de promoción de cultivos con fines no alimentarios.
Motivo	País	Medida voluntaria
Reducción de costos de la disposición de residuos y mejoramiento de la imagen de la ciudad	Austria	Ciudad de Leibnitz: Recolección de aceites usados y uso como biodiésel en la flota.
Imagen regional: «Pureza natural»	Austria	Región turística de Lech / Tirol.
Imagen corporativa: «Nos preocupamos»	Alemania	Sistema de tráfico de buses de Heisberg.
Incentivos para el uso de buses públicos	Austria	Sistema de tráfico de buses de Feldkirch.
Incentivos para el uso de vehículos limpios	Suecia	Estacionamiento gratuito para vehículos con bioetanol.

Fuente: Austrian Biofuels Institute: World-wide trends in production and marketing of biodiesel, presentado en el Seminario ALTENER «New Markets for Biodiesel in Modern Common Rail Diesel Engines», Universidad Tecnológica de Graz, Graz, Austria (22 mayo 2000); Friedrich, 2004.

POLÍTICAS TRIBUTARIAS Y DE FOMENTO

El biodiésel se ha estado produciendo en Europa y los Estados Unidos aún cuando el precio del diésel era significativamente inferior al del biodiésel. Diversos instrumentos económicos y legales han sido utilizados en estos países para fomentar su uso. En los próximos párrafos vamos a ver algunos de ellos.

EN LA UNIÓN EUROPEA

La Unión Europea (UE) está fomentando el uso de biocombustibles como una medida para promover la agricultura sostenible, proteger las áreas campestres, crear valor agregado y empleo en zonas rurales, incrementar los ingresos de los agricultores, reducir los costos de las políticas de apoyo al sector rural y diversificar sus fuentes de energía. La reducción de emisiones de gases de efecto invernadero es sólo una meta secundaria, ya que la eficiencia energética neta de los cultivos de biocombustibles producidos en Europa es baja, y por lo tanto la industria de biocombustibles tiene mucho mayores costos de reducción de emisiones de carbono que otros campos del uso energético (como las mejoras en eficiencia energética o el uso de la energía eólica) (Henniges y Zeddies, 2006).

Los combustibles para el transporte representan cerca de un cuarto de las emisiones de efecto invernadero de la UE, y la demanda por diésel y petróleo sigue creciendo.

La Directiva sobre Biocombustibles actual (2003) de la UE estableció como meta voluntaria que el 2% de la energía para el transporte provenga de fuentes renovables, incluyendo biodiésel y bioetanol, subiendo a 5,75% a partir del 2010 y 20% en 2020. Una ayuda especial para cultivos energéticos fue introducida durante la reforma de la Política Agraria Comunitaria del 2003. Esta ayuda paga un premium de 45 euros por hectárea de cultivo, con un límite máximo presupuestado de 1,5 millones de hectáreas.

Sin embargo, de acuerdo con cálculos de Henniges y Zeddies (2006), los biocombustibles producidos localmente en Europa no serían viables sin subsidios de algún tipo, a menos que los precios del petróleo sean consistentemente superiores a los US\$ 80 por barril. Dado que estos precios aún no se alcanzan, la industria de los biocombustibles en Europa es aún fuertemente dependiente del apoyo político.

11 países miembros han implementado exenciones tributarias, 9 aplican incentivos para la investigación y desarrollo, 5 tienen requerimientos obligatorios de mezcla y 2 utilizan subsidios a la inversión, todo esto para impulsar el mercado del biodiésel (Henniges y Zeddies, 2006):

- ▶ En Francia e Italia las mezclas de biodiésel están exentas de impuestos dentro de una cuota (Rocchietta, 2001).
- ▶ En Alemania hasta el 2006 no se admitían mezclas y el biodiésel puro no era considerado un combustible, y por lo tanto estaba libre del impuesto a los combustibles (Rocchietta, 2001). A partir del 1 de agosto del 2006, la nueva Ley de Impuestos a la Energía, que sustituye a la antigua Ley de Impuestos al Petróleo,

considera un impuesto al biodiésel que crecerá poco a poco hasta igualarse con el diésel en el 2012. Igualmente el aceite vegetal usado directamente como combustible empezará a pagar impuestos desde el 2008, y se igualará con el diésel en el 2012. Solamente los biocombustibles usados en la agricultura y silvicultura seguirán exentos de impuestos, así como los biocombustibles obtenidos de la biomasa sólida. Asimismo, se han fijado niveles de mezcla obligatorios para el biodiésel en el diésel (Kummetz, 2006).

- ▶ Noruega tiene un sistema similar al alemán antes del 2006, pero sus niveles de producción son aún mínimos (Rocchietta, 2001).

- ▶ En el Reino Unido hay una reducción de impuestos en el biodiésel de 20 peniques por litro desde julio del 2002, lo cual ha promovido las inversiones en este sector, pero sin embargo el consumo de este biocombustible es aún limitado comparado con otros países europeos.

- ▶ Muchos otros países de la Unión Europea aún no tienen sistemas de reducción de impuestos (España, Portugal, Grecia, Eslovaquia, Polonia, Hungría), pero están interesados en ampliar su capacidad de producción de biodiésel (Rocchietta, 2001).

Al igual que Alemania, varios otros países de la Unión Europea están considerando reemplazar las exenciones tributarias por sistemas de mezclas obligatorias de combustibles. Sin embargo, este enfoque estaría abriendo las puertas para que las compañías de combustibles sean libres de importar biocombustibles de productores baratos alrededor del mundo, como Brasil. Esto afectaría el programa europeo de producción de biocombustibles y sus ventajas socioeconómicas para la región (Henniges y Zeddies, 2006), además de posiblemente afectar la producción alimentaria y/o los ecosistemas naturales (principalmente bosques) de países tropicales.

EN LOS ESTADOS UNIDOS

En los Estados Unidos, el biodiésel no está exento de los impuestos federales a los combustibles, y tampoco de la mayoría de impuestos estatales o locales. Esto significa que el biodiésel y las mezclas de biodiésel son vendidos con las mismas tasas de impuestos que el diésel convencional. Incluso las personas que producen biodiésel para su autoconsumo en vehículos que circulan por vías públicas están obligadas de remitir ellas mismas los impuestos federales, estatales y locales sobre el combustible que utilizan (incluyendo el biodiésel) a las autoridades competentes (DOE, 2006a).

Solamente algunos Estados ya han aprobado leyes que reducen el impuesto al combustible para el biodiésel o proveen otros incentivos. Otros incentivos que el gobierno federal ofrece para el biodiésel son programas de financiamiento y donaciones, especialmente para el desarrollo y fabricación de vehículos adaptados a combustibles alternativos; para flotas escolares y flotas de tránsito que cambian a este tipo de vehículos; para productores agropecuarios, puertos, contratistas de construcción que invierten en equipamiento que utiliza combustibles más limpios; etc. También, desde el 2005, se ofrecen créditos de impuestos a productores y proveedores de biodiésel (DOE, 2006b). Hay un Programa de Ciudades Limpias que promueve y difunde leyes e incentivos locales y estatales para los combustibles alternativos (DOE, 2006a).

OPCIONES PARA LA PRODUCCIÓN Y USO DE BIODIÉSEL EN EL PERÚ

La Ley de Política Energética de 1992 (EPAct, por sus siglas en inglés), aprobada con la finalidad de reducir la dependencia de los Estados Unidos sobre petróleo importado, establece que ciertas flotas de vehículos (reguladas estatalmente) deben adquirir vehículos que utilicen combustibles alternativos no derivados del petróleo. Mediante el uso de estos vehículos, las flotas adquieren créditos, con los cuales satisfacen la cuota impuesta sobre ellas por la EPAct. Desde el 2001, estas flotas también han sido autorizadas a cumplir hasta la mitad de los requerimientos de la EPAct mediante la compra y uso de biodiésel en mezclas de al menos 20% (DOE, 2006a).

En Brasil

El Brasil tiene una larga experiencia en producción de etanol a partir de caña de azúcar para su uso como combustible, incluyendo el desarrollo de motores adaptados para el uso de etanol puro.

En el campo del biodiésel, en el 2004 fue lanzado el Programa Nacional de Producción y Uso del Biodiésel, que busca impulsar a este combustible como una opción para el desarrollo del agro en las zonas más pobres del país: para la inclusión social. Este programa consta de un marco regulatorio y de metas físicas de uso de biodiésel, y de una planificación de cultivos oleaginosos en todo el país.

Así, en el 2004 fue autorizada la mezcla de 2% de biodiésel en el diésel convencional, y, según la Ley del Biodiésel (Ley 11.097/05), a partir del 2008 este porcentaje de mezcla será obligatorio. Asimismo, a partir del 2013, la mezcla de 5% de biodiésel en el diésel (B5) será obligatoria. La reglamentación también fomenta el uso de biodiésel proveniente de la agricultura familiar, especialmente de la zona semi-árida del país (la más pobre), mediante un sistema diferenciado de impuestos federales, determinados en la Ley 11.116/2005 y el Decreto No. 5.297:

Tabla 3.3: Tributación federal diferenciada para el biodiésel en Brasil

Producto	Impuesto (R\$/litro)	Beneficio(%)
Diésel	0,218	0
Biodiésel sin beneficios sociales	0,218	0
Biodiésel procedente de un agronegocio, en el semi-árido del norte/noreste, a partir de ricino o de palma	0,151	31
Biodiésel procedente de la agricultura familiar en cualquier región	0,070	68
Biodiésel procedente de la agricultura familiar en el semi-árido del norte/noreste, a partir de ricino o de palma	0,000	100

Fuente: Dornelles, 2006.

Sin embargo, críticos señalan que este sistema no beneficiará a los pobres, pues estas exenciones tributarias son otorgadas a los productores de biodiésel – es decir, a los industriales que transforman el aceite en el combustible – en lugar de directamente a los agricultores.

Así, el beneficio será obtenido por los transformadores, en lugar de los agricultores pequeños y pobres. Además, las fuerzas del mercado terminarían beneficiando a los grandes empresarios agrícolas que compran tierras para instalar agricultura en gran escala (debido a temas de acceso a créditos, mejores posibilidades de negociar con los transformadores del biodiésel, el bajo costo de los terrenos en la zona semi-árida, la poca capacidad de negociación de los actuales dueños de la tierra), lo cual llevaría a un nuevo éxodo rural, aumentos de los trabajos temporales y formación de poblaciones marginales en áreas urbanas, como sucedió en la época en que los cultivos de etanol se promovieron. Con el programa de etanol, en muchos casos la frontera agrícola fue desplazada, lo cual creó costos adicionales de transporte para los alimentos, que se tradujeron en costos sociales: mayor precio de los alimentos, menor seguridad alimentaria para los más pobres (Prado, 2006). Estos temas deberán ser evitados en el actual programa de biodiésel.

3.1.3 ¿A CUÁNTO?

En la Figura 3.2 se compara una serie de estimaciones de los rangos de costos para la producción de biodiésel en Europa, Estados Unidos, Argentina y Perú. Tal como se puede apreciar, el costo del biodiésel varía significativamente dependiendo de la materia prima utilizada y el lugar de producción, y su competitividad dependerá del precio del crudo de petróleo, que determinará el precio del diésel.

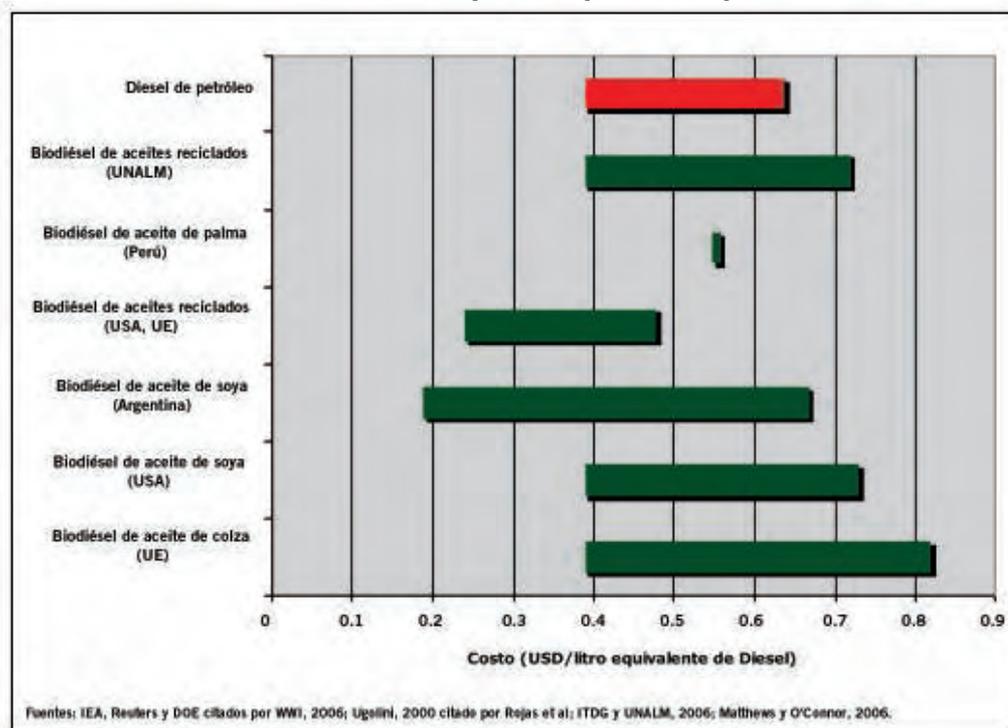
Según estimaciones del Worldwatch Institute (2006), el biodiésel es competitivo en escenarios con precios del petróleo superiores a los US\$ 50 por barril, pero según Henniges y Zeddies (2006), el biodiésel producido en Europa sólo sería competitivo con un precio del petróleo superior a los US\$ 80 por barril.

La Figura 3.2 incluye también los costos de producción de biodiésel en el Perú, en dos escenarios:

- ▶ biodiésel a partir de aceites comestibles reciclados (materia prima adquirida gratuitamente o comprada), en la experiencia de producción a pequeña escala desarrollada por la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), y
- ▶ biodiésel a partir de aceite de palma según estudios realizados por consultores del Ministerio de Energía y Minas.

En ambos casos, los costos del biocombustible se encontrarían dentro de los rangos internacionales respectivos.

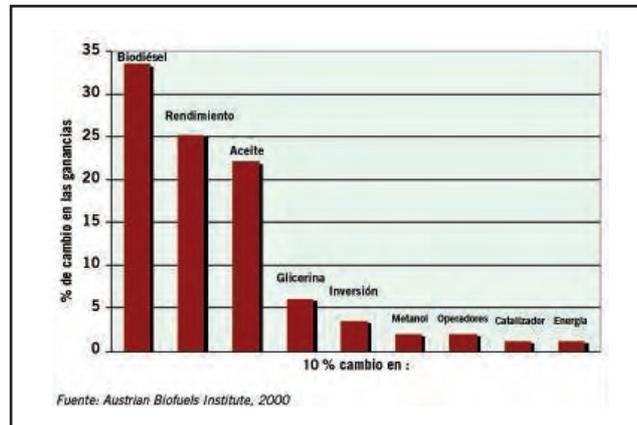
Figura 3.2: Rangos de costos para la producción de biodiésel y diésel (año 2006)



Los principales factores que influyen en la rentabilidad del biodiésel son comparados en la Figura 3.3, que muestra el porcentaje de cambio en las ganancias obtenidas del biodiésel cuando el factor respectivo cambia en un 10%, según estudios realizados por el Austrian Biofuels Institute:

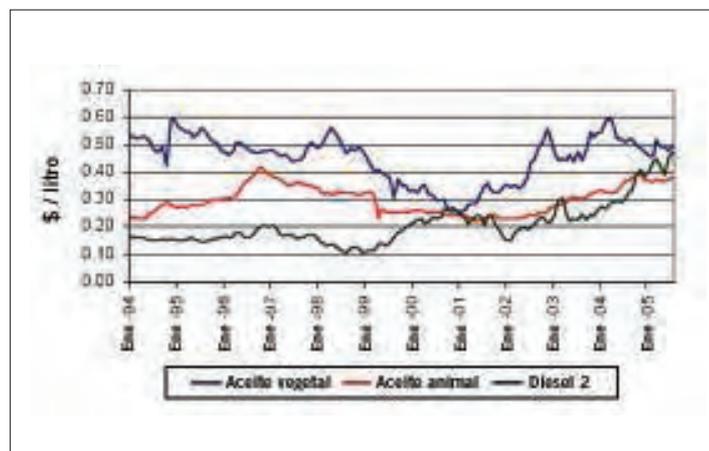
- El factor más importante es el precio mismo del biodiésel, el cual estará en relación directa con el precio del diésel, su competidor directo.
- El segundo factor es el rendimiento en la producción del biodiésel, es decir la eficiencia del proceso de transformación del aceite en biodiésel.
- El tercer factor, también muy importante, es el precio de los aceites, materia prima para producir el biocombustible.
- Menor importancia tienen el precio de la glicerina subproducto del proceso; los costos de inversión en la planta de producción; el precio del metanol, insumo del proceso; el costo de operación (mano de obra); el costo del catalizador, otro insumo menor; y el costo de la energía requerida para el proceso de transformación.

Figura 3.3: Factores de rentabilidad para el biodiésel



Finalmente, como se puede observar en la Figura 3.4, en los últimos diez años la tendencia es al igualamiento de los precios del diésel y de los aceites vegetales y grasas animales (las grasas usadas - «grasa amarilla» tienen un precio aún más bajo), lo cual está permitiendo una mayor rentabilidad del biodiésel con una menor dependencia de subsidios u otras medidas de promoción.

Figura 3.4: Evolución de precios del aceite vegetal, grasa animal y diésel 2 (1994 a 2005)



Fuente: Matthews y O'Connor, 2006

3.2 EL BIODIÉSEL EN EL PERÚ

3.2.1 MATERIAS PRIMAS: ACEITES Y GRASAS

Las materias primas – aceites y grasas vegetales y animales – disponibles para producir biodiésel en el Perú son variadas: aceites vegetales, grasas animales (sebo), aceite de pescado, aceites y mantecas comestibles usados. Sin embargo, su cantidad no es suficiente para satisfacer una posible demanda a gran escala de biodiésel. En la Tabla 3.4 se puede observar un resumen de la producción nacional de cultivos oleaginosos, y en la Tabla 3.5 las importaciones de aceites vegetales realizadas en los años 2004 y 2005. En la Tabla 3.6 se puede apreciar que el Perú es un importador neto de aceites vegetales, con casi un 60% de la demanda total nacional de aceite vegetal proveniente de importaciones en el 2002.

Tabla 3.4: Producción de vegetales oleaginosos en Perú (años 2003-2004)

Producto	Producción por año (toneladas)	
	2003	2004
Fruto de la palma aceitera	180.446	208.538
Algodón con semilla	126.125	160.460
Semilla de algodón	80.000	69.672
Aceituna	38.089	42.198
Aceite de palma	35.000	42.000
Coco	22.989	21.283
Semilla de palma aceitera	8.000	9.000
Maní con cáscara	5.188	5.200
Soya	1.928	2.581
Semilla de linaza	750	850
Semilla de sésamo	76	75
Semilla de ricino	0	0

Fuente: Matthews y O'Connor, 2006.

En resumen: el Perú no cuenta en este momento con producción suficiente de aceites vegetales para satisfacer su demanda por alimentos. ¿Cómo, entonces, podría sustentar una industria del biodiésel si no cuenta con esta materia prima básica?

Tabla 3.5: Importación de aceites comestibles al Perú (años 2004-2005)

Producto	Producción por año (toneladas)	
	2004	2005
Aceite de algodón refinado	0,6	3,9
Aceite de girasol en bruto	7.288,3	10.566,8
Aceite de girasol refinado	341,4	484,2
Aceite de oliva refinado	57,5	58,6
Aceite de oliva virgen	264,7	220,8
Aceite de soya en bruto	212.148,1	240.884,0
Aceite de soya refinado	19.428,0	23.518,7
TOTAL	241.532,6	277.742,0

Fuente: MINAG. Estadística agraria mensual, 2004, 2005.

Tabla 3.6: Balance de oferta y demanda de cultivos oleaginosos en el Perú (años 2001-2002)

Producto	Producción por año (toneladas)	
	2001	2002
Producción	151.673	146.139
Importación	135.288	167.341
Cambios de inventarios	-25.600	-25.700
Exportación	8.288	7.047
Oferta total	253.073	280.732
Alimento para ganado	28.571	42.857
Semilla	3.549	3.770
Residuos	17.588	18.694
Manufactura de alimentos	88.288	87.435
Alimentación humana	113.701	126.062
Otros usos	1.568	2.002

Fuente: Matthews y O'Connor, 2006.

Potenciales materias primas locales

Las materias primas que mayor interés han despertado en el Perú por su potencial para la producción de biodiésel son, sin duda alguna, la palma aceitera en la selva y la coiza canola en la sierra. Otras materias primas potenciales serían también la semilla de

algodón en la costa, el piñón o tempate en zonas diversas, así como algunas fuentes alternativas como los aceites y grasas usadas, el aceite de pescado y el sebo animal. A continuación revisaremos algunos aspectos de estas posibles materias primas (en el Punto 4.1.1 se retoma este tema).

Palma aceitera

El principal cultivo oleaginoso en el Perú es la palma aceitera (*Elaeis guineensis*), que se produce principalmente en la región amazónica, y tendría aún un amplio potencial de crecimiento. Según cifras oficiales, la superficie instalada con plantaciones de palma aceitera en el Perú asciende a 21.200 hectáreas, de las cuales alrededor del 60% (12.400 hectáreas) se encuentran en producción (ver Tabla 3.7). La productividad de estas plantaciones tiene una gran variación según el nivel de tecnología que se emplee. Su rendimiento se encuentra en un rango entre 1,7 y 5,7 toneladas de aceite crudo por hectárea (Sáenz, 2005). Se estima que habría alrededor de 32 mil productores de palma, ubicados en diferentes zonas de Loreto, San Martín, Huánuco y Ucayali, quienes se encuentran organizados en la Confederación Nacional de Palmicultores y Empresas de Palma Aceitera (CONAPAL). Existen además, cuatro plantas extractoras de aceite, ubicadas en Pucallpa, Aguaytía y Tocache, cuya capacidad se encuentra subutilizada en la actualidad. Se requeriría ampliar las áreas de cultivo de palma hasta unas 70 mil hectáreas con el fin de satisfacer la demanda de estas plantas (CEPES, 2004).

Tabla 3.7: Producción actual de palma aceitera en el Perú

Región	Área en producción (ha)	Área en crecimiento (ha)	Área en vivero (ha)	Área por rehabilitar (ha)	Área total (ha)	Producción de racimos (TM)	Producción de aceite crudo(TM)
San Martín	9.800	2.570	1.320	0	13.690	180.000	39.600
Ucayali	2.537	1.895	1.500	0	5.932	36.592	8.050
Loreto	100	500	500	300	1.400	1.200	264
Huánuco	0	0	200	0	200	0	0
TOTAL	12.437	4.965	3.520	300	21.222	217.792	47.914

Fuente: Direcciones Regionales Agrarias de San Martín, Ucayali, Loreto y Huánuco. Elaborado por ProAmazonía (Sáenz, 2005).

Los cultivos nacionales de palma aportan a la industria de aceites y grasas 48 mil toneladas de aceite, que representa solamente el 15% de la demanda nacional. En contraste, en el 2005 se importaron 278 mil toneladas de aceites vegetales, de los cuales el 87% correspondió a aceite de soya bruto. Se requiere entonces, ampliar la producción nacional de palma aceitera para satisfacer la demanda nacional por aceites comestibles, reduciendo las necesidades de importaciones, y constituyendo además una oportunidad para la sustitución de cultivos ilícitos de coca en la zona de selva.

El Perú cuenta con condiciones edafoclimáticas favorables para el cultivo de palma en la Amazonía (Sáenz, 2003), lo cual ha impulsado diversas iniciativas en torno a este cultivo. La CONAPAL, por ejemplo, tiene un programa para ampliar la superficie sembrada a 50 mil hectáreas hasta el año 2010. DEVIDA, por su parte, tiene un programa de apoyo económico para la sustitución de cultivos (CEPES, 2004). Por otro lado, existe un Plan Nacional de Promoción de la Palma Aceitera, que tiene como objetivo «promover, bajo un enfoque de mercado, el desarrollo de la palma aceitera, a fin de aumentar la oferta interna de aceites vegetales que favorezca la sustitución competitiva de importaciones y contribuya a mejorar el nivel de vida del productor en armonía con la preservación del medio ambiente» (Sáenz, 2003)²⁵. En este Plan intervienen, además del Ministerio de Agricultura, el Instituto Nacional de Recursos Naturales (INRENA), el Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana (IIAP), varios productores agroindustriales y el World Wildlife Fund (WWF). Este Plan contempla la Zonificación Económica-Ecológica con el fin de identificar las tierras con potencial para este cultivo: de acuerdo con el Ministerio de Agricultura, existen alrededor de 1,4 millones de hectáreas con capacidad para soportar plantaciones de palma aceitera (ver Tabla 3.8); aunque recientemente el INRENA determinó una disponibilidad de tierras aptas de 4,8 millones de hectáreas, de las cuales 510 mil hectáreas (casi un 10%) se encuentran en zonas sin bosque (Sáenz, 2003, ver Tabla 3.9).

Tabla 3.8: Áreas potenciales de palma aceitera - Perú 1999

Departamento	Zona	Hectáreas
Amazonas	Condorcanqui	300.000
Cusco	Bajo Urubamba	30.000
Huánuco	Tomavista	15.000
Huánuco	Pachitea	40.000
Huánuco - Ucayali	Honoría - Iparia	50.000
Loreto	Pastaza - Tigre	180.000
Loreto	Ramón Castilla	140.000
Loreto	Manití	300.000
San Martín	Tocache - Juanjui	100.000
San Martín	Cainarachi - Barranquita	50.000
Ucayali	Padre Abad	100.000
Ucayali	Atalaya	100.000
TOTAL	1'405.000	

Fuente: Ministerio de Agricultura, n/d.

²⁵Mediante D.S. 015-2000-AG se declaró de interés nacional la instalación de plantaciones de palma aceitera, y mediante R.M. 0155-2001-AG se aprobó el Plan Nacional de Promoción de la Palma Aceitera. Mediante R.M. 0488-2005-AG se constituyó el Comité Técnico de Coordinación para la Promoción de la Cadena Productiva de Palma Aceitera.

Tabla 3.9: Disponibilidad de tierras para el cultivo de palma aceitera en el Perú

Región	Área altamente adaptable (ha)		Área moderadamente adaptable (ha)		Área total con bosque (ha)	Área total sin bosque (ha)	Área total (ha)
	Con bosque	Sin bosque	Con bosque	Sin bosque			
Amazonas	6.454		65.448	239	71.902	239	72.141
Cusco	8.916		86.980		95.896	0	95.896
Huánuco	179.829	57.425	22.106	49.710	201.935	107.135	309.070
Junín			48.972	5.642	48.972	5.642	54.614
Loreto	1'024.458	6.365	1'021.031	66.945	2'045.489	73.310	2'118.799
Pasco	7.987	5.632	12.461		20.448	5.632	26.080
San Martín			133.132	119.634	133.132	119.634	252.766
Ucayali	792.423	43.141	936.514	155.347	1'728.937	198.488	1'927.425
TOTAL	2'020.067	112.563	2'326.644	397.517	4'346.711	510.080	4'856.791

Fuente: INRENA, citado por Sáenz, 2003.

A pesar del panorama prometedor para la palma aceitera en el Perú, se han dado ya las primeras voces de preocupación por el peligro que el cultivo indiscriminado de esta especie puede significar. El Movimiento Mundial por los Bosques Tropicales (WRM, 2006) menciona el caso de un proyecto en Yurimaguas, Loreto, donde «antes de darse a conocer los resultados del estudio de impacto ambiental del proyecto, se informa que ya se ha iniciado la deforestación de 2 mil hectáreas en la zona de Shanusi». Este proyecto tendría impactos sobre el hábitat de especies silvestres que no han sido considerados ni objetados por las autoridades ambientales nacionales (CONAM y/o INRENA), además de afectar los derechos territoriales de comunidades campesinas que habitan en su zona de influencia y que no han podido obtener títulos formales de propiedad de su tierra por razones económicas. El reconocido ecólogo peruano Antonio Brack (2007), por su parte, alerta que «en los tiempos actuales se está promoviendo la tala de bosques, en gran parte primarios, para implantar el cultivo extensivo de palma de aceite y caña de azúcar para producir biocombustibles... en Balsapuerto (Yurimaguas), Orellana y Requena (Loreto)». Brack recomienda que «la política para una Amazonía sostenible debería ser muy clara: conservar los bosques y hacer producir las tierras colonizadas e improductivas». Precisa además que «el Perú posee aún 63 millones de hectáreas de bosques amazónicos y con la colonización ya hemos intervenido, talado y quemado cerca de 10 millones de hectárea» y que «se ha producido un desastre de enorme envergadura, porque de las tierras ocupadas para ampliación de la frontera agropecuaria el 80% está abandonado y no produce, y la pobreza es generalizada». Agrega, finalmente que «es verdaderamente incomprensible que se permita la tala masiva de bosques primarios para nuevas iniciativas empresariales, que muy bien se pueden realizar en las tierras ya colonizadas e improductivas».

Colza canola

La colza canola²⁶ (*Brassica napus*), después de la soya y la palma, es la tercera fuente de aceite vegetal más importante del mundo. En el Perú, sin embargo, su producción es prácticamente inexistente, pese a que en los últimos meses ha despertado mucho interés ya que viene siendo promovida por el Programa Sierra Exportadora como uno de sus principales programas productivos, cuyos planes contemplarían la instalación de 20 mil a 200 mil hectáreas de colza canola en la sierra del Perú.

El Plan de Acción del Programa de la Canola y Biocombustibles del Programa Sierra Exportadora (2007) contemplaría: la identificación de futuros compradores de biodiésel; la implementación de parcelas de producción experimental; el desarrollo de un paquete tecnológico agrícola; el desarrollo de misiones tecnológicas a grandes países productores; la promoción de la siembra de 20 mil ha de canola; el desarrollo de mecanismos financieros para asociaciones de productores; la institucionalización de la industria a través de la creación del Instituto Altoandino del Biocombustible; la mejora del marco normativo, promoviendo la aprobación de la Ley del Biodiésel; y el desarrollo del mercado de semillas para permitir la importación de semillas.

Estimaciones más detalladas (Benza, 2006) consideran que, de instalarse 60 mil hectáreas de colza canola en la sierra se requeriría una inversión de US\$ 42 millones en cultivos, además de US\$ 40 millones en plantas de procesamiento. En estos cálculos, se considera un rendimiento promedio de 929 litros de biodiésel por hectárea, por lo que esta iniciativa debería contribuir con la producción de alrededor de 55 millones de litros de biodiésel por año. Se requerirían, sin embargo, algunas experiencias piloto que aporten mayor información sobre la real viabilidad y rendimiento de este cultivo en las condiciones de la sierra peruana, ya que los datos utilizados en los cálculos realizados se basan en cosechas de países del hemisferio norte y, muy probablemente, requieran de un ajuste a las condiciones locales.

El IIPROFRUTH (2007) organizó en marzo del 2007 una mesa redonda sobre la canola y su posible impacto ambiental y socioeconómico en las zonas altoandinas del Perú. Entre las principales conclusiones y recomendaciones de este evento resaltan las siguientes: no se cuenta con el insumo semilla de canola; la producción de canola está aún en su fase experimental pues se está validando experiencias desarrolladas en la década de los años 70 utilizando variedades diferentes a las actuales; es necesario desarrollar mayor investigación antes de iniciar la producción intensiva y extensiva de canola, en especial la evaluación de variedades adaptadas a las zonas de producción, problemas fitosanitarios, validación de metodologías de producción foráneas, entre otras; se debe evitar sembrar canola en zonas donde se originen los ríos para evitar su contaminación o que afecte el caudal en las partes bajas, y en zonas cercanas a áreas naturales protegidas para proteger nuestra biodiversidad.

²⁶ La canola (Canadian Oil Low Acid) es una variedad de colza desarrollada en Canadá con bajos niveles de ácido erúico y glucosinolatos; actualmente es la más utilizada en el mundo.

Piñón

Si bien la producción y las experiencias en el Perú con el piñón o tempate (*Jatropha curcas*) son más bien escasas, éste es otro de los cultivos que ha generado gran interés por sus posibles ventajas que presentaría para la producción de biodiésel. A saber (Foidl y Eder, 1997; Henning, 1998; Vinayak y Singh, 1998): crece desde el nivel del mar hasta los mil metros sobre el nivel del mar; se adapta a suelos pobres, arenosos y/o alcalinos; es muy resistente a la sequía, requiriendo un mínimo de 250 mm/año de precipitación para sobrevivir; para su producción óptima se requeriría entre 900 y 1.200 mm/año de precipitación; es un cultivo perenne, con una vida útil de 30 a 50 años; se estima que la fijación de CO₂ en troncos y raíces estaría entre las 7 y 8 t/ha/año, más del doble que cualquier cultivo maderero.

Esta planta oleaginosa es nativa de América y actualmente se encuentra difundida a lo largo de las regiones tropicales áridas y semiáridas de América, África y Asia. En el Perú es usual encontrar el piñón utilizado como cerco vivo, en la selva alta del norte de la región Cajamarca, aprovechando su toxicidad que mantiene alejado al ganado. De modo más reciente se tiene noticias de las primeras plantaciones que se habrían instalado, tanto en condiciones de selva baja (Ucayali), como de costa (Lima y Piura).

La gran rusticidad y adaptabilidad de este cultivo se basaría en su variabilidad genética, lo cual le permite resistir condiciones tan diversas y exigentes, como las de la costa desértica o la selva tropical lluviosa. Sin embargo, esta cualidad, muy probablemente se presente como dificultad cuando se desee obtener cierta uniformidad y homogeneidad en grandes extensiones de cultivo. Tal como sucedió con el ricino (*Ricinus communis*) en Brasil (conocido en dicho país como mamona), se requerirá invertir importantes recursos y periodos de tiempo en la investigación e identificación de las variedades más apropiadas para la producción de aceite a gran escala en cada región.

Especies oleaginosas amazónicas

El uso de especies nativas oleaginosas amazónicas sería más apropiado para las condiciones extremas y frágiles de la selva tropical del Amazonas, lamentablemente, el avance en cuanto a investigación, caracterización y conocimiento de estas especies es aún muy incipiente. En el marco del Proyecto Biodiésel UNALM y Soluciones Prácticas - ITDG (ver Punto 3.2.4) se realizó un inventario de 24 especies vegetales oleaginosas de la selva peruana con potencial teórico para la producción de biodiésel (ver Tabla 4.2) y posteriormente se realizaron pruebas de producción de biodiésel a partir del aceite de especies a las cuales se pudo acceder, destacando el aguaje (*Mauritia flexuosa*), umari (*Poraqueiba sericea*), ungarahui (*Oenocarpus bataua*), piñón (*Jatropha curcas*), castaña (*Bertholetia excelsa*) y sachá inchi²⁷ (*Plukenetia volubilis*). Incluso se llegó a realizar una evaluación forestal de materia prima oleaginosa en zonas específicas de la selva baja, estudiándose principalmente individuos de poloponta o palmera aceitera americana (*Elaeis oleifera*), huasai (*Euterpe predatoria*), sinamillo (*Oenocarpus mapora*), huicungo (*Astrocaryum murumuru*) y sachamangua (*Grias neuberthii*).

²⁷ La calidad, y por ende el precio, de los aceites de castaña y de sachá inchi es muy elevado. Las pruebas realizadas con estas especies tuvieron un interés científico, antes que comercial. Estos aceites tienen otros usos más rentables que la producción de biodiésel.

Los resultados de estos estudios y análisis, por un lado, confirman la distancia en términos de investigación y, por lo mismo, en rendimientos de la palma aceitera africana respecto de las especies amazónicas. Pero por otra parte, identifica algunas especies nativas interesantes que deberían estudiarse con mayor detalle y tiempo, principalmente la paloponta o palma aceitera americana, que si bien presenta rendimientos menores que la palma foránea, es posible que sea mucho más recomendable para las condiciones específicas de la Amazonía peruana.

Aceites y grasas usadas

La cantidad disponible de aceites y grasas usados (conocidos también como *grasa amarilla*) depende de la población humana y de sus hábitos de consumo alimenticio. Se ha estimado que en la zona de Lima habría 4 millones de litros de grasa amarilla disponibles anualmente. En ciudades de Norteamérica se calcula que se producen anualmente 4,5 litros de grasa amarilla por persona, lo cual, con una población de 7,8 millones de habitantes en Lima Metropolitana, equivaldría a unos 35 millones de litros de grasa amarilla por año.

Dados los diferentes hábitos de consumo en el Perú²⁸, sin embargo, cabe suponer que la cantidad real disponible es mucho menor, posiblemente cercana a los 4 millones mencionados anteriormente (Matthews y O'Connor, 2006). Un inconveniente inmediato supondría la logística de recolección que habría que implementar para el recojo de esta grasa amarilla.

Por otra parte, y a diferencia de lo que ocurre en países europeos o en los Estados Unidos, en el Perú, estos materiales de desecho tienen un precio de mercado, ya que son reutilizados informalmente para diversos fines. Sin embargo, su uso puede ser interesante en determinados nichos (especialmente cuando se tenga disponibilidad o acceso a este tipo de insumos). Finalmente, la transformación de esta grasa amarilla en biodiésel podría tener como principal beneficio, evitar su vertimiento en los desagües y, por ende, a cuerpos de agua como mares, ríos o lagos.

Aceite de pescado

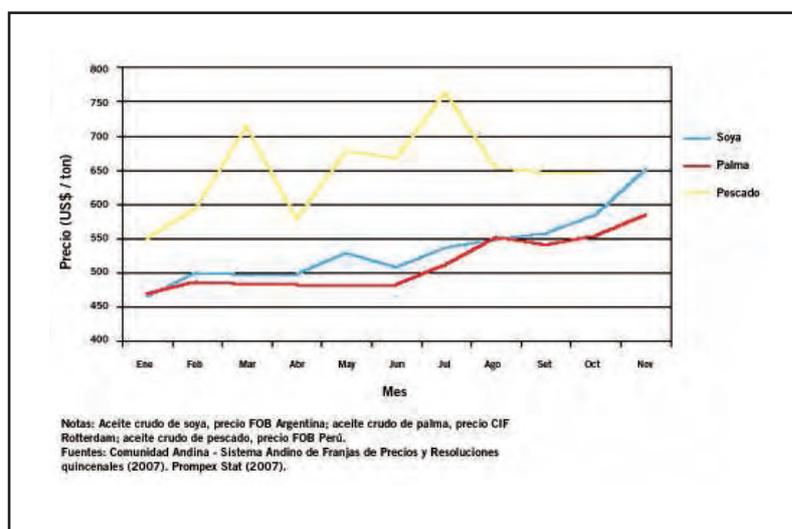
El aceite de pescado, finalmente, es otra opción de materia prima para el biodiésel, y en el Perú se produce en gran cantidad: según cifras del Ministerio de la Producción, en el año 2005 se fabricó un total de 290 mil toneladas de aceite de pescado crudo. Sin embargo, aún existe poca experiencia en el mundo en producción de biodiésel a partir de este aceite, y por lo tanto se requiere investigación específica sobre el proceso de producción y la calidad del combustible que se obtendría²⁹.

²⁸ Por un lado, el menor consumo de frituras, y por el otro, el reuso indiscriminado de aceites y grasas en la fritura, con el fin de ahorrar costos. El consumo per cápita de aceites y grasas comestibles es 5 veces menor en el Perú que en los Estados Unidos (Daly, 2003).

²⁹ Una interesante experiencia de producción de biodiésel utilizando aceites de pescado residuales se da en Canadá, donde la empresa Ocean Nutrition Canada, que utiliza aceites locales e importados (incluyendo aceite de pescado de origen peruano) para la fabricación de productos nutricionales, vende sus aceites residuales a un productor de biocombustibles (Matthews y O'Connor, 2006).

Por otro lado, los precios del aceite de pescado son aún muy altos (ver Figura 3.5): la tonelada de aceite crudo de pescado cuesta US\$ 640 (promedio FOB en Perú durante el 2006), mientras que el crudo de soya costó un promedio de US\$ 534 (aunque con una tendencia marcadamente creciente) y el crudo de palma solamente US\$ 511 (precios CIF en Rotterdam).

Figura 3.5: Evolución del precio de los aceites comestibles crudos (año 2006)

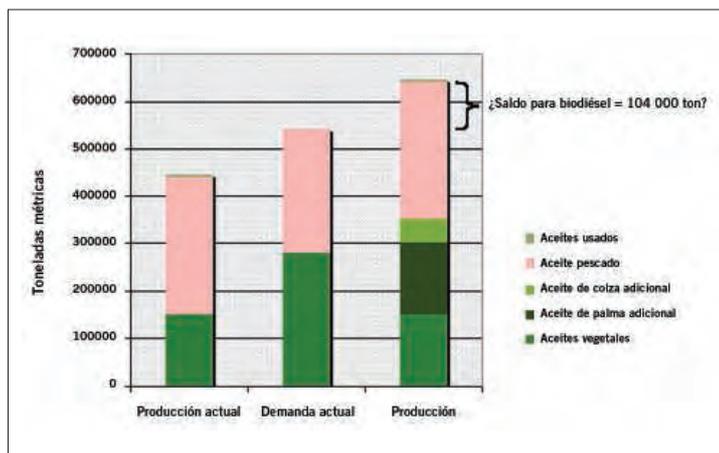


¿Fuente oleaginosa principal?

Una pregunta recurrente suele ser, ¿en qué cultivo se puede sustentar el desarrollo del biodiésel en el Perú? No hay, sin embargo, una respuesta única a ello, ya que el cultivo a recomendar dependerá de la zona, clima y disponibilidad de insumos, tierra y agua.

Podemos, sin embargo, hacer un ejercicio de proyección, basados en los planes anunciados de expansión de los cultivos de palma y colza (que pueden llegar a realizarse o no). En la Figura 3.6 puede apreciarse un resumen esquemático de la situación actual y de la situación potencial de las principales fuentes de materia prima oleaginosa en el Perú, que comparadas con la demanda actual (para producción alimentos y, en el caso del aceite de pescado, para exportación), nos estarían mostrando el *saldo potencial* de aceite disponible para la producción de biodiésel. Cabe mencionar que la demanda puede variar según la evolución de los precios y el mercado; además, la posibilidad de que parte de la producción de aceite de pescado, destinada hoy a la exportación, se use en el futuro para producir biodiésel, no está considerada en el gráfico.

Figura 3.6: Producción y demanda actual y potencial de aceites en el Perú



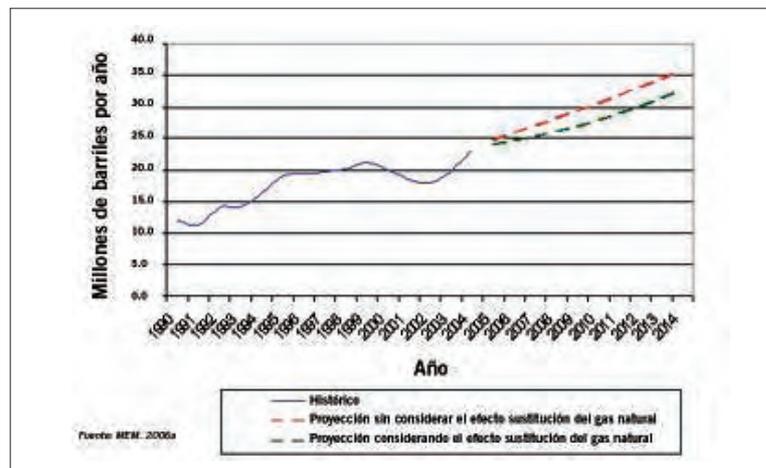
Si los planes anunciados de ampliación de los cultivos de palma y colza llegan a realizarse, y la demanda de aceites para producción de alimentos y para exportación (aceite de pescado) no varía, se podría disponer de aproximadamente 104 mil toneladas de aceites para la producción de biodiésel. No obstante, en el mejor de los casos (es decir, si los planes anunciados se llevan a cabo) el incremento en la producción de aceite tomaría algunos años. En este contexto, es muy probable que las primeras iniciativas empresariales de producción de biodiésel a gran escala en el Perú requieran iniciar sus operaciones con aceite importado. Esto, si bien puede ser económicamente rentable, tiene posibilidades de arrojar un balance energético negativo.

3.2.2 EL CONSUMO DE DIÉSEL 2

La demanda por diésel 2 en el Perú se ha mantenido relativamente constante en los últimos 10 años, aunque claramente por encima de los niveles de producción nacional, tal como se puede apreciar en la Figura 2.1 presentada anteriormente. Sin embargo, si el análisis se extiende a lo sucedido desde principios de los años 90, y se proyecta además, a los próximos años, tal como se grafica en la Figura 3.7, se pueden apreciar incrementos significativos en el consumo de diésel 2 en el Perú. Según estadísticas del MEM (2005a), se pasó de un consumo de poco menos de 12 millones de barriles en 1990, a más de 23 millones en el año 2004. Puesto en perspectiva de su participación en el mercado de combustibles derivados del petróleo, la proporción del diésel 2 en el mercado nacional pasó de algo menos del 28% en 1990, al 42% en el 2004. Esto se explicaría, principalmente, por la política tributaria aplicada a los combustibles desde la década de los años 90, la cual no fue muy coherente con la producción nacional y distorsionó el consumo interno (Cunza y Díaz, 2006). No obstante, proyecciones realizadas

por el propio MEM (2005a) prevén que el consumo de diésel 2 seguiría incrementándose de manera importante, superando los 32 millones de barriles anuales en el 2014, aún considerando el efecto de sustitución del gas natural. Lo crítico de esta situación radica en que el diésel 2 cada vez se producirá menos en el país y, además, es el más caro de importar (Cunza y Díaz, 2006).

Figura 3.7: Demanda estimada del diésel 2 (años 1990-2014)



Específicamente, en el sector transporte, se estima un consumo promedio de 2,6 millones de toneladas (alrededor del 81,5% del consumo total de diésel para el 2005) (MEM, 2007a). Si se decidiese reemplazar el 2% de diésel 2 en este sector, se requerirían algo más de 50 mil toneladas anuales de biodiésel. Si la sustitución fuese del 5%, la cantidad requerida de biodiésel ascendería a unas 130 mil toneladas por año.

3.2.3 MARCO LEGAL Y PROMOCIÓN DESDE EL ESTADO

El Perú cuenta con un marco legal específico para la promoción de los biocombustibles, conformado por:

- ▶ Ley N° 28054: Ley de Promoción del Mercado de Biocombustibles, de agosto del 2003.
- ▶ D.S. N° 013-2005-EM: Reglamento de la Ley de Promoción del Mercado de Biocombustibles, de marzo del 2005.
- ▶ D.S. N° 021-2007-EM: Reglamento para la Comercialización de Biocombustibles, de abril del 2007.
- ▶ Directiva N° 004-2007-PROINVERSIÓN: Lineamientos del Programa de Promoción del Uso de Biocombustibles - PROBIOCOM, de marzo del 2007.

Para la elaboración de la propuesta de Ley se constituyó un Grupo Técnico de Biocombustibles (2002), liderado por el CONAM, el cual en su informe técnico presentó al biodiésel como una *«oportunidad para reemplazar progresivamente parte de la importación de diésel, y reducir la contaminación ambiental, generando al mismo tiempo nuevas oportunidades de desarrollo agrícola y agroindustrial en el país»* planteándolo principalmente en base a la promoción del cultivo de palma aceitera y soya.

La Ley N° 28054, entonces, *«establece el marco general para promover el desarrollo del mercado de los biocombustibles sobre la base de la libre competencia y el libre acceso a la actividad económica, con el objetivo de diversificar el mercado de combustibles, fomentar el desarrollo agropecuario y agroindustrial, generar empleo, disminuir la contaminación ambiental y ofrecer un mercado alternativo en la lucha contra las drogas»*. Aunque la ley trata de biocombustibles en general, se orienta específicamente a la promoción de los biocombustibles líquidos, específicamente el biodiésel y etanol. Entre sus acertadas políticas generales incluye: la generación de investigación; la formación de recursos humanos de alta especialización; el desarrollo de proyectos experimentales y la transferencia de tecnología; la participación privada para la producción; y el incentivo de la comercialización para utilizar los biocombustibles en todos los ámbitos de la economía puros o mezclados con otro combustible.

La Comisión Técnica de Biocombustibles (2004), liderada por el CONAM, y conformada para proponer y recomendar las normas y disposiciones para el cumplimiento de la Ley N° 28054, en su informe final centra su trabajo únicamente en el etanol anhidro ya que *«el uso de biodiésel en el plano internacional se encuentra en fase de introducción/experimentación a pequeña escala y los fabricantes de vehículos automotores aún no recomiendan plenamente su utilización como biocombustible en mezcla con diésel»* e incluyen un anexo denominado *«Factores que limitan la posibilidad para considerar al biodiésel como opción de combustible comercial en el corto plazo»*. Estos factores serían, fundamentalmente, que: *«los fabricantes de vehículos automotores aún no otorgan garantías que certifiquen la posibilidad de consumir biodiésel como combustible motor en forma pura o en mezcla con diésel»*; *«en el Perú no se han registrado experiencias a nivel industrial en materia de producción de biodiésel»*; sustituir 5% de diésel significaría reemplazar 898 745 barriles, cosechar alrededor de 26 mil hectáreas (con un rendimiento promedio de 5 500 litros de aceite por hectárea, lo cual *«supone un nivel de tecnología avanzado en comparación a la condición media de producción que se observa en las plantaciones de palma aceitera existentes en el país»*) con un costo de 2500 US\$/ha; *«el déficit de producción de aceite comestible en el Perú representa un aspecto que restringirá la producción de biodiésel a partir del fruto de la palma aceitera (reemplazar las 130 mil toneladas/año de aceite comestible que en la actualidad se importa, requeriría contar con cerca de 27 mil hectáreas adicionales de palma aceitera)»*; y *«llevar a cabo un programa de inversión de esta dimensión (55 mil hectáreas) requeriría no menos de una década suponiendo un ritmo de crecimiento de algo más de 5 mil ha/año»*.

El Reglamento de la Ley N° 28054 publicado en el 2005, sin embargo, sí incluye un porcentaje y cronograma de aplicación y uso de biodiésel en el Perú. No obstante, este Reglamento contenía varios aspectos susceptibles de ser mejorados, destacando los siguientes (Coello y Castro, 2006):

► **Definición:** el Reglamento definía el biodiésel como una «mezcla de ésteres de ácidos grasos saturados e insaturados de diferentes masas moleculares derivados de la transesterificación de aceites y grasas de origen vegetal» con lo cual se excluye tanto al biodiésel que pudiera ser obtenido a partir de grasas y/o aceites de origen animal, como al que pudiera ser obtenido mediante procesos distintos a la transesterificación.

► **Porcentaje de mezcla:** el Reglamento señalaba que habría una mezcla denominada *diésel ecológico* que consistirá en 5% de biodiésel y 95% de diésel convencional, sin embargo no se precisaba si esta proporción era voluntaria u obligatoria; o si era mínima o máxima.

► **Cronograma de aplicación y uso de biodiésel:** el Reglamento establecía que desde el 1ro de enero del 2008 el diésel ecológico se comercializaría en las regiones de la selva, y desde el 1ro de enero del 2010 en todo el país.

► **Compradores autorizados y lugares de mezcla:** el Reglamento indicaba que sólo los distribuidores mayoristas de combustibles líquidos debidamente registrados en el Ministerio de Energía y Minas (16 empresas en todo el país a marzo del 2007) son los únicos autorizados a comprar biodiésel en el mercado nacional; y que sólo en sus plantas de abastecimiento (36 plantas en 15 regiones en todo el país) se podrían realizar las operaciones de mezcla del biodiésel con el diésel.

► **(In)definiciones sobre aspectos tributarios:** La Ley y el Reglamento no especifican si el biodiésel en el Perú estaría afecto al Impuesto Selectivo al Consumo (ISC), que afecta a los combustibles fósiles.

En abril del 2007 se aprobó el Reglamento para la Comercialización de Biocombustibles, el cual, si bien no reemplaza al Reglamento de la Ley explicado en párrafos anteriores, sí mejora substancialmente varios puntos críticos y medulares que dificultaban iniciativas y emprendimientos. Cabe resaltar que este nuevo Reglamento se prepublicó en noviembre del 2006 a fin de recibir comentarios y sugerencias para enriquecer la norma propuesta. Las principales novedades y mejoras que incorpora este Reglamento para la Comercialización de Biocombustibles son:

► **Definición:** se incluye la posibilidad de emplear, también, grasas animales y aceites comestibles usados, como fuentes para la producción del biodiésel.

► **Porcentaje de mezcla:** se contempla la comercialización de mezclas que contengan 2% de biodiésel en 98% de diésel (denominado Diésel B2), 5% de biodiésel en 95% de diésel (Diésel B5), 20% de de biodiésel en 80% de diésel (Diésel B20). No está permitida la comercialización de mezclas en proporciones diferentes.

► **Cronograma para la comercialización de biodiésel B100 (puro) y de Diésel BX (mezclas de biodiésel en diésel):** se establece que a partir de abril del 2007 será posible comercializar biodiésel puro (Biodiésel B100) y Diésel B20 a los consumidores directos autorizados por la Dirección General de Hidrocarburos, así como Diésel B2 en todo el país; desde el 1ro de enero del 2009, será obligatoria la comercialización del Diésel B2, en reemplazo del Diésel N° 2; y desde el 1ro de enero del 2011, será obligatoria la comercialización del Diésel B5, en reemplazo del Diésel B2.

► **Compradores autorizados y lugares de mezcla:** se mantiene la restricción referida a que son los distribuidores mayoristas los únicos autorizados para comprar Biodiésel B100 para mezclar con Diésel N° 2 y comercializarlo posteriormente. Se abre, sin embargo, la posibilidad que las empresas productoras de Biodiésel B100 puedan vender a consumidores directos autorizados por la Dirección General de

Hidrocarburos, para lo cual deberán registrarse como distribuidores mayoristas sin la obligación de tener un volumen mínimo de ventas ni una existencia mínima media mensual.

► **Aspectos tributarios:** este Reglamento tampoco aborda el tema de posibles exenciones tributarias. Sin embargo, de acuerdo con el Texto Único Ordenado de la Ley del Impuesto General a las Ventas (IGV) e Impuesto Selectivo al Consumo (ISC) (D.S. 055-99-EF, actualizado al 05/11/2004), el ISC es un impuesto que grava una lista específica de productos, en la cual no se encuentra incluido el biodiésel, y por lo tanto este combustible no estaría sujeto a él. No obstante, durante los primeros meses del 2007, el Ministerio de Economía y Finanzas (MEF) ha estado evaluando los posibles beneficios tributarios para los biocombustibles en el Perú.

Por otra parte, PROINVERSIÓN, mediante la Resolución del Director Ejecutivo N° 014-2007 de marzo del 2007 aprobó los Lineamientos del Programa de Promoción del Uso de Biocombustibles (PROBIOCOM). Este programa tiene por objeto «promover las inversiones para la producción y comercialización de biocombustibles, así como, difundir las ventajas económicas, sociales y ambientales de su uso». En tanto esta es una tarea multisectorial, PROINVERSIÓN ha identificado los siguientes grupos de trabajo: Grupo I de Promoción del consumo y aspectos tributarios (coordinado por CONAM y conformado por MEM, PETROPERÚ, MEF y DEVIDA); Grupo II de Normas técnicas y ensayos sobre mezclas (coordinado por PROINVERSIÓN y conformado por MEM y PETROPERÚ); Grupo III de Reglamento de comercialización y competencias (coordinado por MEM y conformado por OSINERGMIN, PRODUCE y MINAG); Grupo IV de Exploración agrícola y asociatividad (coordinado por MINAG y conformado por PROINVERSIÓN, CONAM y Programa Sierra Exportadora); y Grupo V de Desarrollo tecnológico y cooperación internacional (coordinado por PRODUCE y conformado por MINAG, CONCYTEC, DEVIDA y Programa Sierra Exportadora).

3.2.4 INICIATIVAS RELACIONADAS CON EL BIODIÉSEL EN EL PERÚ

De forma paralela al marco legal, se han venido desarrollando en el Perú algunas experiencias, tanto en ámbitos académico y de cooperación, como en sectores agrícola e industrial, e incluso microempresarial.

Ámbito académico y de cooperación

Proyecto Biodiésel UNALM / Soluciones Prácticas - ITDG

En la sede de Lima de Soluciones Prácticas – ITDG (antes ITDG) en el año 2000 se realizaron las primeras pruebas documentadas de producción de biodiésel en el Perú, las mismas que se probaron con éxito en motocultores³⁰ de la Facultad de Ingeniería Agrícola de la UNALM. Posteriormente, desde el año 2003, y hasta la actualidad, estas instituciones conformaron un equipo permanente de investigación, con sede en el Laboratorio de Energías Renovables

³⁰ Vehículos tractores de un solo eje.

de dicha universidad, orientado principalmente al estudio de dos posibles escenarios para la producción y uso de biodiésel en el Perú: la elaboración artesanal y a pequeña escala en comunidades amazónicas aisladas a partir de aceites de especies vegetales abundantes, nativas o introducidas como una posible solución al problema de acceso a la energía de dichas comunidades; y, la producción a partir de aceites vegetales usados en zonas urbanas para ser usado como aditivo del combustible diésel en vehículos de transporte terrestre para reducir las emisiones de gases contaminantes y como una alternativa para resolver la disposición final de los aceites usados.

En ambos escenarios, se ha buscado identificar las condiciones requeridas que permitan hacer viable – técnica, económica, social, económica, legal y ambientalmente – la producción de biodiésel a pequeña y mediana escala en el Perú, tanto en zonas urbanas, como en comunidades amazónicas aisladas, incluyendo la superación de las barreras que se identifiquen. Con el apoyo del CONCYTEC se han llevado a cabo los siguientes proyectos: entre el 2003 y el 2005, el primer proyecto de investigación científico-tecnológica de biodiésel en el Perú, denominado *Producción de biodiésel a pequeña escala a partir de recursos oleaginosos amazónicos*; entre el 2004 y el 2005, el estudio *Diseño de un sistema sostenible de producción y uso de biodiesel apropiado para poblaciones aisladas de la selva amazónica*, contando además con la participación de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI); entre el 2005 y el 2006 se realizó la *Construcción y puesta en operación de la planta modelo de producción biodiesel*; y recientemente, entre el 2006 y el 2007, se viene desarrollando la investigación *Deshidratación de etanol a pequeña escala para la producción de biodiésel en poblaciones aisladas de la selva amazónicas*.

Por otra parte, el 1ro de septiembre del 2006, con el apoyo de InWEnt – Internationale Weiterbildung und Entwicklung gGmbH (Capacity Building International, Germany) se realizó el *1er Seminario Internacional Perspectivas del Biodiésel en el Perú: tecnología, legislación, ambiente y economía*³¹, con el fin de propiciar un espacio de diálogo para conocer y discutir los avances, opciones y limitaciones de la producción y uso de biodiésel en el Perú, tanto en aspectos técnicos, legales, ambientales, económicos y sociales. En este evento se contó con la participación, tanto de entidades públicas, como privadas, relacionadas con el desarrollo del biodiésel en el Perú.

Proyecto de biodiésel en San Martín

Se tuvo conocimiento de un proyecto de producción de biodiésel a partir de aceites vegetales en la región San Martín emprendido por ADRA Perú (Agencia de Desarrollo y Recursos Asistenciales) en el año 2005. Se tenía previsto producir mil galones diarios de biodiésel en la provincia de Picota. Sin embargo, en el último año no se tuvieron mayores noticias de esta iniciativa.

³¹ Todas las exposiciones realizadas se pueden encontrar en www.itdg.org.pe/biodiesel.

Libro Combustibles alternativos para el desarrollo de la industria regional

La Universidad de Lima, a través de su Fondo Editorial, publicó la investigación *Combustibles alternativos para el desarrollo de la industria regional*, la cual comprendía «el estudio comparativo de los combustibles alternativos, la materia prima para fabricarlos, la tecnología de los procesos productivos y algunos aspectos de costos de inversión y operación en relación con el desarrollo industrial regional del Perú». Los combustibles analizados fueron: biodiésel, bioetanol, dimetil éter (DME y BioDME), gas natural y propano.

Sectores agrícola, industrial y microempresarial

En la medida que el marco legal y sus dispositivos aún se encuentran en fase de mejora o implementación, las distintas iniciativas comerciales desarrolladas han sido de carácter más bien piloto o experimental.

El diario El Comercio, en sus ediciones del 28/11/2005 y 26/02/2007 daba cuenta de la planta de producción de biodiésel de la empresa INCOMATIC en el distrito de Puente Piedra, en Lima.

Por su parte, la empresa Biodiésel Perú Internacional S.A.C, informa en su página Web (<http://www.biodieselperu.com>) la puesta en marcha de su planta con tecnología de la firma argentina Ingeniería Bioquímica en la provincia de Huarochirí.

El Grupo Herco, por su lado, anunció en el *1er Seminario Internacional Perspectivas del Biodiésel en el Perú* el inicio de operaciones de su planta de producción de biodiésel ubicada en Lurín, a 33 kilómetros al sur de Lima, para el año 2007.

Asimismo, el diario Correo, en su edición del 03/08/2006 informa sobre el anuncio del Grupo Romero respecto a la creación de la empresa Agroenergía S.A. y la intención de producir biodiésel a partir del aceite crudo de palma en la región San Martín (distrito de Uchiza, provincia de Tocache) y en la región Loreto en un plazo de cinco años.

De modo más reciente, y con gran cobertura periodística, en febrero del 2007, la empresa Pure Biofuels Corporation inició la construcción de su planta de producción de biodiésel en el Callao, la misma que empezaría a operar hacia el segundo semestre del mismo año.

Asimismo, cabe resaltar la interesante iniciativa del ingeniero químico Agustín Jacobo González³², quien ha implementado una pequeña planta de producción de biodiésel en el distrito de Villa El Salvador, que se abastece con aceite vegetal usado recolectado de restaurantes de la zona.

³² ajgperu@yahoo.com.

Por otro lado, se puede destacar el interés de la Asociación Agropecuaria Nuevo Tiwinsa, de la región Ucayali, por emprender cultivos oleaginosos para la producción de biocombustibles en tierras deforestadas de dicha región, impulsando además la constitución legal de la empresa Biodiésel Ucayali S.R.L. y despertando el interés de la empresa Oleaginosas Amazónicas S.A. (OLAMSA) en la elaboración de biodiésel a nivel industrial.

3.2.5 PERSPECTIVAS EN EL PERÚ

No es posible dar una respuesta general y de aplicación a todo el territorio sobre la conveniencia, o no, de impulsar la producción de biocombustibles en el Perú. Esto, tal como se explicó anteriormente, dependerá de *dónde, cómo y para qué*.

Si nos referimos a cultivos, queda primero por resolver y/o cubrir los altos porcentajes de aceite que actualmente se importan para consumo humano. Incluso si se analiza únicamente desde un punto de vista económico, es muy probable que la opción de dedicar los cultivos oleaginosos para producción de aceite para consumo humano o para producción de biodiésel varíe, dependiendo de las zonas y de la época del año.

Respecto a la palma aceitera y el posible peligro que podría representar su expansión a gran escala en la selva amazónica, se tendrían que definir criterios y condiciones bajo los cuales sería conveniente su promoción en ecosistemas tan frágiles y biodiversos como la Amazonía, así como mecanismos de monitoreo que permitan asegurar que su expansión se focalice en zonas, por ejemplo, deforestadas.

Sobre el potencial de la colza canola y el piñón, un trabajo previo a realizar y resolver se refiere a la identificación y adaptación de las variedades más apropiadas para las diferentes condiciones agroclimáticas propuestas. Los mayores retos, respecto a este tema, se encuentran en el terreno agronómico y social, antes que en el energético, especialmente cuando se requieren de decenas de miles de hectáreas.

Los programas regionales y/o los de la cooperación internacional sobre la promoción de cultivos para la producción de biocombustibles deberán evaluar si el destino de esta producción es para la producción y uso local, o si se destinará para el envío del aceite como tal a otras regiones con mercados potenciales mayores. Dos detalles que suelen pasarse por alto son: la necesidad de insumos, como metanol o etanol anhidro, si se desea producir biodiésel localmente; y que usualmente, los mercados potenciales más importantes para el consumo de biodiésel no se encuentran necesariamente adyacentes a las principales zonas de producción.

En lo referente a los porcentajes de mezcla, porcentajes obligatorios como los aprobados en el Reglamento para la Comercialización de Biocombustibles (2% desde el 2009 y 5% desde el 2011) tendrán como principal efecto una gran demanda por aceite, y por ende de cultivos oleaginosos, que podría impulsar un crecimiento importante en el sector agrícola. Será necesario entonces, que el PROBIOCOM enfatice el establecimiento de subprogramas de investigación y promoción de fuentes oleaginosas que permitan abastecer los volúmenes de aceite que serán requeridos. Para referirnos a ventajas medioambientales y mejora de la calidad de las emisiones, éstas se darán básicamente en aquellos casos que se utilicen biodiésel puro (Biodiesel B100) o incluso hasta en mezclas de Diesel B20 (20% de biodiésel y 80% de diésel).

PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL: MATERIAS PRIMAS E INSUMOS

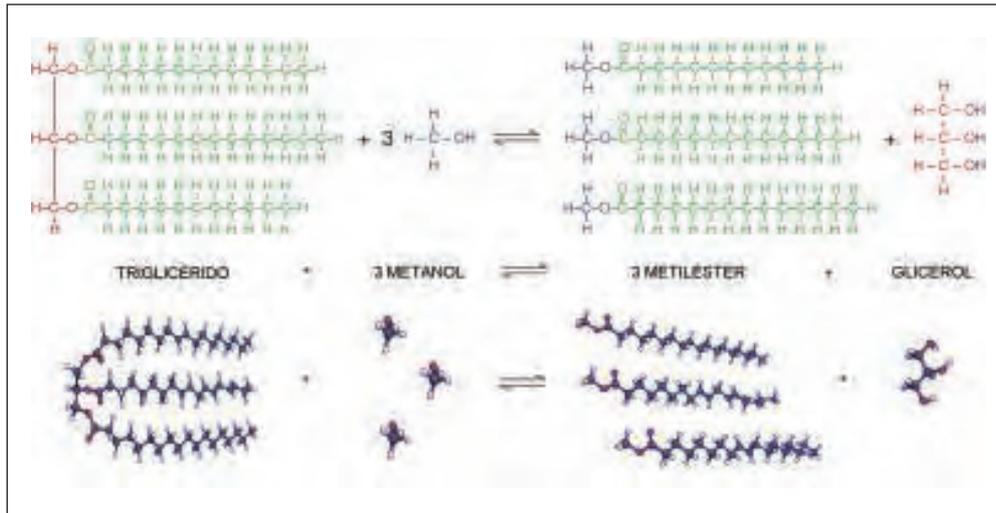
Como vimos en el Capítulo 1, el biodiésel es un biocombustible derivado de aceites o grasas vegetales o animales, que puede ser usado en forma pura o mezclado con diésel de petróleo. Se compone de *ésteres mono-alquílicos de ácidos grasos de cadena larga*, obtenidos mediante la *transesterificación de aceites o grasas vegetales o animales con un alcohol*.

La idea del proceso de transesterificación es reemplazar el glicerol de los triglicéridos³³ por alcoholes simples, como el metanol o etanol. De esta manera, se obtienen moléculas en forma de cadena larga, muy similares en su forma y sus características físicas a las moléculas de los hidrocarburos. La principal ventaja que se logra con este proceso es reducir la viscosidad del aceite hasta un nivel muy cercano al del diésel 2.

³³ Como veremos en los siguientes párrafos, los triglicéridos son las moléculas que conforman los aceites y grasas animales o vegetales.

La reacción de transesterificación se puede ver en la Figura 4.1:

Figura 4.1: Reacción de transesterificación



A pesar de que esta reacción química puede parecer muy simple en el esquema – finalmente, es sólo cuestión de reemplazar glicerol por metanol o etanol – existen diversos factores que influyen en ella:

- ▶ La calidad de las materias primas
- ▶ El tipo, calidad y cantidad de alcohol utilizado
- ▶ El tipo de catalizador³⁴ utilizado
- ▶ Las condiciones físicas del proceso: temperatura, agitación, presión, tiempo.

En las siguientes secciones describiremos primero las materias primas para la producción de biodiésel – aceites y grasas – en cuanto a sus fuentes y principales características fisicoquímicas que influyen en la transesterificación. Luego describiremos los principales insumos que intervienen además en el proceso: alcoholes y catalizadores. Con esta base en el capítulo siguiente explicaremos en detalle el proceso de producción de biodiésel.

³⁴ Un catalizador es una sustancia química que interviene en una reacción para facilitar que se realice, pero que no forma parte de los productos finales, es decir, debe poder ser recuperado al final del proceso. Generalmente se requieren muy pocas cantidades de estos catalizadores.

4.1 MATERIAS PRIMAS: ACEITES Y GRASAS

4.1.1 FUENTES DE MATERIA PRIMA

Las dos fuentes más comunes de aceites y grasas para producir biodiésel son:

- ▶ Cultivos oleaginosos
- ▶ Tejidos adiposos (grasos) de animales beneficiados.

Además, se está experimentando en diversos lugares para obtener biodiésel a partir de:

- ▶ Algas productoras de aceites
- ▶ Aceites residuales de cocina
- ▶ Grasas residuales provenientes, por ejemplo, de plantas de tratamiento de aguas o de trampas de separación de grasas.

Cultivos oleaginosos

Los vegetales que contienen grandes cantidades de aceite en sus semillas o frutos se conocen como *oleaginosos*. Estas plantas provienen de diferentes familias botánicas y se han adaptado a las diferentes regiones climáticas del planeta, aunque las regiones tropicales son las que albergan la mayor cantidad de variedades de ellas. Solamente una decena de especies se usa con propósitos comerciales, existiendo centenares de cultivos oleaginosos de uso localizado de los que se tiene poco conocimiento pero que son excelentes fuentes de aceite. En la Tabla 4.1 se presenta una relación de los cultivos oleaginosos más comúnmente producidos en el mundo con sus principales características agronómicas, y en la Tabla 4.2 algunos ejemplos de especies oleaginosas tropicales, principalmente amazónicas, aún poco – o nada – utilizadas de manera comercial.

4.1.2 EXTRACCIÓN DE ACEITES Y GRASAS

Los aceites vegetales se obtienen a partir de las semillas o frutos que los contienen mediante extracción química con solventes (se utiliza principalmente hexano como solvente) o, en menor medida, por medios físicos como la aplicación de grandes presiones. El aceite de palma y el de oliva aún se obtienen por medios físicos utilizando prensas hidráulicas. El aceite de canola se extrae combinando el prensado con la extracción por solventes: las semillas de canola se separan en escamas, se cuecen, se laminan, se mediopresan y a continuación se extraen con solventes (Lawson, 1994).

La extracción por solventes es el medio más eficiente para obtener el aceite de soya o de la semilla de algodón, lográndose un 9% a 12% más de aceite y con menos impurezas que mediante la presión mecánica. Con la extracción por solventes se requiere menos calentamiento, obteniéndose un aceite de mejor calidad y ahorrando energía. La fracción oleosa de las semillas se solubiliza en el hexano durante la extracción, y a continuación el hexano se destila y se reutiliza. Dada su alta volatilidad, el residuo de solvente que queda en el aceite es mínimo o nulo (Lawson, 1994). Sin embargo, este método es menos apropiado para aplicaciones rurales, ya que requiere equipamiento grande y sofisticado.

Tabla 4.1: Principales cultivos oleaginosos y sus características agronómicas

Nombre común y científico	Parte oleaginosa	Contenido de aceite (%)	Rendimiento promedio kg/ha/año	Requerimientos agronómicos generales	Principales usos	Principales productores
Palma aceitera <i>Elaeis guineensis</i>	Pulpa del fruto (aceite de palma) Semilla (aceite de palmiste)	Pulpa: 45 – 55 Semilla: 44 – 57	Pulpa: 5 mil Semilla: 800	Palmera de climas tropicales, requiere mínimo 1.600 mm de lluvia anual y 2-4 meses secos. Soporta inundaciones temporales, y requiere bastante luz y humedad del suelo adecuada. Se desarrolla mejor en áreas bajas. Temperaturas máximas medias de 30-32, y mínimas de 21-24°C. Demora 4-5 años en empezar a dar fruto, y alcanza su mayor productividad poco antes de los 20 años.	Palma: Margarina, grasas para cocinar, productos alimentarios, jabones, velas, cosméticos, lubricantes, jebes. Palmiste: Grasas alimentarias, helados, mayo- nesa, repostería, jabones, detergentes, biodiésel.	Malasia, Indonesia, Nigeria, Tailandia, Colombia, Brasil
Soya <i>Glycine max</i>	Semilla	18 – 20	280 – 580	Herbácea anual adaptada a climas desde los trópicos hasta los subtropicos húmedos. No resiste calor excesivo o inviernos severos, su temperatura óptima es 24-25°C, pero resiste temperaturas medias anuales entre 5,9 y 27°C. Requiere días cortos, aunque esta característica depende del cultivar. Crece mejor en suelos fértiles y bien drenados. Leguminosa, en asociación con <i>Rhizobium</i> puede fijar nitrógeno y no requiere fertilización con N. Se ha reportado que tolera precipitaciones entre 310 y 4.100 mm. El periodo de crecimiento es de 4 a 5 meses. Se usa en rotación con maíz, granos pequeños, otras legumbres, algodón, arroz. Puede plantarse después de papas tempranas y vegetales, o después de granos de invierno.	Aceite para ensaladas, margarinas, productos alimenticios, jabones, pinturas, insecticidas, desinfectantes, biodiésel. Lecitina extraída del aceite se usa como emulsificante en la industria de alimentos y farmacéutica. La torta es una fuente importante de proteína para alimento animal y humano.	Estados Unidos, Brasil, Argentina, China, India, Paraguay, Canadá

OPCIONES PARA LA PRODUCCIÓN Y USO DE BIODIESEL EN EL PERÚ

Nombre común y científico	Parte oleaginosa	Contenido de aceite (%)	Rendimiento promedio kg/ha/año	Requerimientos agronómicos generales	Principales usos	Principales productores
Colza y canola <i>Brassica napus</i> , <i>Brassica rapa</i>	Semilla	40	700 – 1500	Planta anual o bianual de flores amarillas, adaptada a climas fríos. Requiere suelos fértiles y bien drenados, y responde favorablemente a la fertilización con N y P. Días soleados y noches frescas favorecen su crecimiento; el clima seco durante la cosecha es esencial. Tolerancia precipitaciones anuales entre 300 y 2.800 mm y temperaturas medias entre 5 y 27°C. Puede ser plantada luego de granos, maíz, papas, remolacha o después del barbecho, pero no después de colza, mostaza o girasol. La canola es una variedad de colza con bajo contenido de ácido erúico (<2%) apta para consumo humano y con características agronómicas mejoradas, desarrollada mediante ingeniería genética en Canadá.	Productos alimentarios, lubricantes, jabones, biodiésel.	India, China, Canadá, Alemania, Francia
Girasol <i>Helianthus annuus</i>	Semilla	45 – 55	600 – 950	Planta herbácea anual mejor adaptada a climas cálidos o templados. Puede crecer desde el Ecuador hasta los 55° de latitud. En los trópicos, crece mejor en elevaciones medias y altas. Intolerante a la sombra, pero tolerante a la sequedad y la sequía, excepto cuando está floreciendo. Puede crecer en suelos pobres, siempre que sean profundos y bien drenados. No resiste suelos ácidos o inundados. Tolerancia precipitaciones anuales entre 200 y 4 mil mm y temperatura entre 6 y 28°C. En zonas cálidas, las variedades enanas maduran 2,5-3 meses después de la siembra. No debe ocurrir en rotación más de una vez cada 4 años, y no debe estar en rotación con papas.	Aceite para ensalada y para cocinar, margarina, lubricantes, jabones, pinturas y esmaltes.	Federación Rusa, Ucrania, India, China, Argentina, Estados Unidos

Nombre común y científico	Parte oleaginosa	Contenido de aceite (%)	Rendimiento promedio kg/ha/año	Requerimientos agronómicos generales	Principales usos	Principales productores
Algodón <i>Gossypium hirsutum</i>	Semilla	18 – 25	300	Arbustiva anual adaptada a regiones tropicales a temperaturas. Tolera precipitaciones anuales entre 290 (con irrigación) y 2.780 mm y temperatura entre 7 y 27,8°C. Es sensible a las heladas y requiere un mínimo de 180-200 días de temperaturas uniformemente altas. Se cultiva en altitudes entre 0 y 1.200 m. Requiere luz solar directa. Requiere lluvia moderada durante el período vegetativo, y un período seco para permitir a los copos que maduren. Se desarrolla mejor en suelos profundos, friables, con alta retención de humedad y buena cantidad de humus. Se recomienda rotar, aunque es posible cultivarlo sólo.	Aceite para ensalada y para cocinar, margarina y para coberturas protectoras.	India, China, Estados Unidos, Pakistán, Uzbekistán, Brasil
Ricino o higuera <i>Ricinus communis</i>	Semilla	45 – 55	1200	Árbol o arbusto perenne de zonas tropicales, pero se puede comportar como anual en regiones templadas. Se ha reportado que tolera precipitaciones entre 200 y 4290 mm anuales y temperaturas entre 7 y 27,8°C, pero los óptimos están en 750-1000 mm y 20-25°C. Crece mejor con altas temperaturas, y muere con las heladas. Es bastante tolerante a las sequías. Se desempeña mejor en suelos fértiles y bien drenados, no alcalinos ni salinos. Limo arenoso y arcilloso es el mejor.	En coberturas protectoras, lubricantes, tintas, tintes textiles, preservación del cuero, fibras sintéticas, pinturas, ceras, velas, crayones.	China, India, Brasil
Piñón <i>Jatropha curcas</i>		24 – 34 (incluyendo cáscara)	1.590	Arbusto o árbol de hasta 6 m, esta planta es originaria de zonas tropicales. Tolera precipitaciones anuales entre 480 y 2.380 mm, y temperaturas entre 18 y 28,5°C.	Iluminación, jabón, velas.	

Fuentes: Dorsa (2004); Poku (2002); Lawson (1994); Heller (1996); Rehm y Espig (1991); Duke (1983); FAOSTAT.
*: Rendimiento promedio calculado considerando los principales países productores.

Tabla 4.2: Oleaginosas tropicales

Nombre común	Nombre científico	Parte oleaginosa	Rendimiento estimado de aceite en plantaciones (kg/ha/año)	Contenido de aceite del fruto o semilla (%)
Aguaje	<i>Mauritia flexuosa</i>	Pulpa	2.400	21,1
Almendro	<i>Caryocar villosum</i>	Pulpa y semilla	270	
Almendro colorado	<i>Caryocar glabrum</i>	Semilla		37
Babasu	<i>Orbignia phalerata</i>	Semilla	90 - 150	72
Bacuri	<i>Platonia insignis</i>	Semilla		46
Castaña	<i>Bertholletia excelsa</i>	Semilla	1575	69,3
Chopé	<i>Gustavia longifolia</i>	Pulpa		30
Coco	<i>Cocos nucifera</i>	Endocarpio	610 - 732	66
Copoasu	<i>Theobroma grandiflorum</i>	Semilla	482 - 808	
Hamaca Huayo	<i>Couepia dollicopoda</i>	Semilla	70 - 80	
Huasái	<i>Euterpe precatoria</i>	Pulpa y semilla		
Inchi	<i>Caryodendron orinocense</i>			41 - 59
Marañón	<i>Anacardium occidentale</i>	Nuez		46,3
Olla de Mono	<i>Lecythis pisonis</i>	Almendra		
Pijuayo	<i>Bactris gasipaes</i>	Pulpa y semilla	2.000	23
Poloponta	<i>Elaeis oleifera</i>	Pulpa y semilla	1.800	16,2
Sacha Inchi	<i>Plukenetia volubilis</i>	Almendra	51,4	
Sacha Mangua	<i>Grias neuberthii</i>	Pulpa	165	
Sinamillo	<i>Oenocarpus mapora</i>	Pulpa		
Totai	<i>Acrocomia totai</i>	Pulpa y semilla	12-15 (pulpa)	60 (almendra)
Tucuma	<i>Astrocaryum vulgare</i>	Pulpa y semilla		43,7
Umari	<i>Poraqueiba sericea</i>	Pulpa	530	21,2
Ungurahui	<i>Oenocarpus bataua</i>	Pulpa	240 - 525	19, (mesocarpo) 14,5 (epicarpo)
Uxi	<i>Dickesia verrucosa</i>	Pulpa	20,2	

Fuentes: Coello et al, 2006; Tratado de Cooperación Amazónica, 1997; Villachica, 1996.

Las grasas animales se obtienen de los tejidos animales durante el sacrificio, mediante su derretido con calor seco o con vapor. La manteca de cerdo y el sebo de vaca contienen generalmente agua y proteína que deben ser eliminadas y niveles relativamente altos de ácidos grasos libres que deben reducirse mucho antes de poder utilizar estas grasas (Lawson, 1994).

4.1.3 COMPOSICIÓN DE LOS ACEITES Y GRASAS

Los aceites y grasas vegetales o animales están compuestos principalmente por moléculas denominadas *triglicéridos* (o triacilgliceroles), que son ésteres³⁵ de tres ácidos grasos unidos a un glicerol. Se caracterizan por ser insolubles en agua y solubles en solventes orgánicos no polares (Lawson, 1994).

Los *ácidos grasos* son compuestos carboxílicos terminales (terminan con un radical carboxilo - COOH) de cadena abierta alifática de C8 a C24 de longitud. Pueden ser *saturados* (cuando no contienen dobles ni triples enlaces entre los átomos de carbono) o *insaturados* (cuando contienen uno o más dobles o triples enlaces entre los átomos de carbono) (Arango, 2002). Los dobles enlaces entre átomos de carbono son más reactivos que los enlaces simples y pueden, por ejemplo, reaccionar con hidrógeno para transformarse en enlaces simples. Un ácido graso con dos o más insaturaciones (*poliinsaturado*) es más inestable y reacciona con hidrógeno, oxígeno y otros elementos aún más fácilmente que los ácidos grasos monoinsaturados (Lawson, 1994).

El *glicerol* es un trioxialcohol, 1,2,3-propanotriol, es decir, está formado por una cadena de tres carbonos, cada uno unido a un grupo alcohólico (OH) (Mortimer, 1983).

Cuando todos los ácidos grasos de un triglicérido son idénticos, éste se denomina *triglicérido simple*. Sin embargo, los más comunes son los *triglicéridos mixtos*, en los cuales se encuentran presentes dos o tres ácidos grasos diferentes (Lawson, 1994).

Cuando los triglicéridos han perdido uno o dos de sus ácidos grasos, se denominan *di- y monoglicéridos*, respectivamente (Lawson, 1994), y éstos pueden estar presentes también en aceites no refinados o ya degradados.

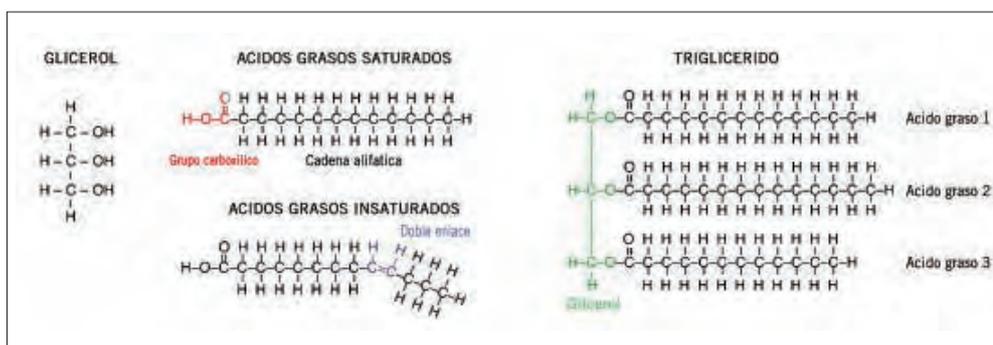
Los aceites y grasas animales y vegetales son mezclas de triglicéridos diferentes, los cuales a su vez están compuestos frecuentemente por ácidos grasos diferentes. Sus propiedades físicas y químicas están relacionadas directamente con el número y estructura química de los ácidos grasos unidos al glicerol, así como con el grado de saturación de los ácidos grasos y su longitud de cadena.

³⁵ Un éster es una sustancia química resultante de la unión de un alcohol y un ácido graso. En el caso de los triglicéridos, puede decirse que ellos son ésteres triples (un alcohol triple unido a tres ácidos grasos). En el caso del biodiésel, este es un éster simple (un alcohol simple unido a un ácido graso). El proceso de producción de biodiésel se denomina transesterificación: porque consiste en la conversión de un éster en otro tipo de éster.

Comúnmente, las grasas se clasifican en *aceites* y *mantecas*. Los aceites son líquidos a temperatura ambiente y contienen una mayor proporción de ácidos grasos insaturados, mientras que las mantecas son sólidas a temperatura ambiente y contienen mayor proporción de ácidos grasos saturados (Mortimer, 1983).

En la Figura 4.2 se puede observar la configuración química del glicerol, de un ácido graso saturado, un ácido graso insaturado y un triglicérido.

Figura 4.2 Configuración química del glicerol, ácidos grasos y triglicéridos



Cualquier ácido graso no unido a glicerol o a alguna otra molécula en un aceite o grasa se denomina *ácido graso libre* (AGL). La mayoría de aceites no refinados contienen cantidades relativamente altas de AGL. El aceite de soya crudo, por ejemplo, contiene típicamente entre 0,5 y 1,5%. El aceite crudo de palma contiene entre 3% y 5% de ácidos grasos libres. Los aceites y grasas refinados para uso alimenticio deben tener un nivel de AGL inferior al 0,05% (Lawson, 1994).

Los aceites o grasas recién extraídos de los animales o semillas oleaginosas se denominan *brutos* o *crudos*. Además de los triglicéridos, contienen cantidades variables de otras sustancias presentes naturalmente, como ácidos grasos libres, proteína, fosfolípidos, fosfátidos, ceras, resinas y pigmentos. Aunque estén presentes en cantidades relativamente pequeñas, estas sustancias aportan colores, olores y sabores extraños, inestabilidad y formación de espuma y humo durante la fritura de alimentos. Por eso, para aceites de uso comestible todas estas sustancias deben ser retiradas (Lawson, 1994). El caso es diferente cuando se produce biodiésel: algunas de estas sustancias son desfavorables para la producción de este combustible, pero otras pueden permanecer sin alterar su calidad o estabilidad.

4.1.4 ÁCIDOS GRASOS

Debido a que constituyen la parte predominante y químicamente activa de los triglicéridos, los ácidos grasos que los constituyen son los que determinan sus propiedades fisicoquímicas.

Ácidos grasos saturados

Los ácidos grasos saturados que se encuentran en los aceites y grasas se indican en la Tabla 4.3, indicando sus puntos de fusión y ebullición.

Tabla 4.3: Ácidos grasos saturados y sus principales características

Ácido	Número de átomos de carbono	Fórmula	Punto de ebullición a 16 mm (°C)	Punto de fusión (°C)
Butírico	4	C_4H_7COOH	163 (a 760 mm)	-8
Caproico	6	$C_6H_{11}COOH$	107	-3,4
Caprílico	8	$C_8H_{15}COOH$	135	16,7
Caprílico	10	$C_{10}H_{19}COOH$	159	31,6
Láurico	12	$C_{12}H_{23}COOH$	182	44,2
Mirístico	14	$C_{14}H_{27}COOH$	202	54,4
Palmitico	16	$C_{16}H_{31}COOH$	222	62,9
Esteárico	18	$C_{18}H_{35}COOH$	240	69,6
Aráquico	20	$C_{20}H_{39}COOH$	-	75,4
Behénico	22	$C_{22}H_{43}COOH$	-	80,0
Lignocérico	24	$C_{24}H_{47}COOH$	-	84,2

Fuentes: Lawson (1994); Bailey (1951).

Ácidos grasos insaturados

Los ácidos grasos insaturados que se encuentran en los aceites y grasas, dada la relativa dificultad de su aislamiento y su caracterización, son conocidos con menos seguridad que los saturados. En general, los ácidos de un grado limitado de insaturación han sido más o menos identificados pero existe gran incertidumbre en lo que respecta a los miembros más insaturados. Los ácidos grasos intensamente insaturados, con cuatro o más enlaces dobles, que se encuentran en los aceites marinos, son particularmente difíciles de estudiar por la facilidad con que se isomerizan o polimerizan por acción del calor o de los agentes químicos. En la Tabla 4.4 encontramos una relación de los ácidos grasos insaturados más importantes.

Tabla 4.4: Ácidos grasos insaturados más importantes

Nombre común	Nombre de Ginebra	Número de átomos de carbono	Número de dobles enlaces	Fórmula
Miristoleico	Tetradecenoico	14	1	$C_{13}H_{25}COOH$
Palmitoleico	Hexadecenoico	16	1	$C_{15}H_{29}COOH$
Oleico	Octadecenoico	18	1	$C_{17}H_{33}COOH$
Linoleico	Octadecadienoico	18	2	$C_{17}H_{31}COOH$
Linolénico	Octadecetrienoico	18	3	$C_{17}H_{29}COOH$
Araquidónico	Eicosatetraenoico	20	4	$C_{19}H_{31}COOH$
Erúcico	Docosenoico	22	1	$C_{21}H_{41}COOH$

Fuentes: Lawson (1994); Bailey (1951).

4.1.5 PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS DE LAS GRASAS Y ACEITES

Los aceites y grasas pueden ser caracterizados según sus propiedades físicas (densidad, viscosidad, punto de fusión, índice de refracción) o químicas (índice de acidez, índice de yodo, índice de peróxido, índice de saponificación, índice de éster). A continuación detallaremos las más importantes para la producción de biodiésel.

Viscosidad

La viscosidad es una medida de la fricción interna entre moléculas, o de la resistencia a fluir de los líquidos. En general, la viscosidad de los aceites desciende con un incremento en la insaturación y con un decrecimiento del peso molecular de sus ácidos grasos (Lawson, 1994).

Índice de acidez

El índice de acidez (IA) es el número de mg de KOH necesario para neutralizar los ácidos grasos libres (es decir, que no se encuentran unidos a un glicérido) de 1 g de aceite. Se determina mediante la titulación o valoración del aceite disuelto en alcohol con una solución estándar de KOH. Un valor elevado para este índice muestra que el aceite contiene una *alta cantidad de ácidos grasos libres*, ya que ha sufrido un alto grado de hidrólisis (Arango, 2002). Puede expresarse también como porcentaje de ácido oleico, palmítico o láurico, según el ácido graso que predomine en la grasa en cuestión.

Los aceites y grasas refinados deben tener un nivel de ácidos grasos libres inferior al 0,2% como ácido oleico para ser aptos para su uso en alimentación (NTP 209.001.1983). Sin embargo, los aceites crudos y los usados previamente en frituras, comúnmente tienen un contenido de ácidos grasos libres significativamente superior a éste (2% o más).

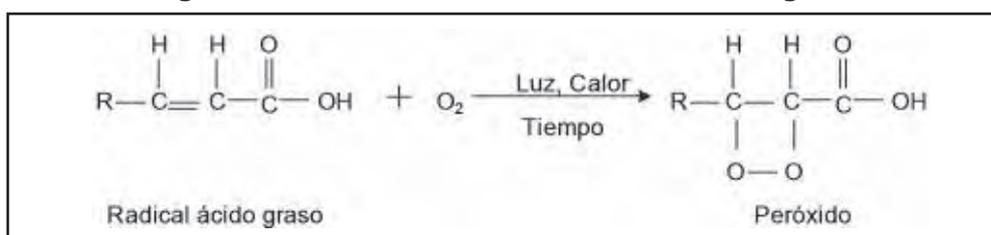
Este índice es particularmente importante para el proceso de producción de biodiésel (transesterificación), ya que los ácidos grasos libres reaccionan con el catalizador de la transesterificación (NaOH ó KOH) formando jabones (saponificación), lo cual lleva a un menor

rendimiento en la producción de biodiésel. La saponificación no sólo consume el catalizador necesario para la transesterificación, sino que además los jabones producidos promueven la formación de emulsiones que dificultan la purificación de biodiésel (Zhang *et al.*, 2003).

Índice de peróxido

El índice de peróxido (IP) mide el grado de oxidación primaria que ha sufrido la grasa o aceite. Los peróxidos son los productos de descomposición primaria de la oxidación de las grasas, cualquiera sea su composición. Se forman en los puntos de insaturación de las cadenas de carbonos de los ácidos grasos, tal como se puede apreciar en la Figura 4.3.

Figura 4.3: Reacción de oxidación de un ácido graso



Luego de la formación de peróxidos ocurren reacciones secundarias de oxidación, que dan lugar a otros productos como perácidos, aldehídos, cetonas, alcoholes, etc. y posteriormente a compuestos cíclicos, aromáticos y polímeros, los cuales no son detectados por este índice. Entonces, se debe utilizar el índice de anisidina, que indica el contenido de aldehídos y cetonas (Dorsa, 2004). Por lo tanto, el IP sólo mide la primera fase de la oxidación de aceites y grasas. Un aceite apto para su consumo, deberá tener un índice de peróxido inferior a 5 meq O₂/kg (NTP 209.001.1983).

La oxidación de las grasas es una de las principales causas de su deterioro, y da lugar a la aparición de olores y sabores desagradables, conocidos como enranciamiento (Fennema, 1993).

La oxidación inducida por el aire a temperatura ambiente se denomina *autooxidación*. Generalmente es un proceso lento, y se necesita un tiempo considerable para producir una cantidad suficiente de peróxidos que generen enranciamiento (Lawson, 1994). Los aceites que contienen una proporción más elevada de ácidos grasos insaturados son más propensos a la oxidación que los que contienen cantidades más bajas, y los ácidos grasos con mayor cantidad de insaturaciones son aún más propensos.

La velocidad de oxidación crece con un incremento en la temperatura, con la exposición al oxígeno del aire, presencia de luz y contacto con materiales pro-oxidantes (por ejemplo, el cobre metálico, latón, bronce u otras aleaciones que contengan cobre) (Lawson, 1994). La oxidación se acelera, por lo tanto, durante la fritura del aceite y también durante la estadia del biodiésel en el motor.

Los aceites y grasas naturales de origen vegetal tienen pequeñas cantidades de sustancias capaces de inhibir la oxidación en cierto grado. El alfa-tocoferol es el antioxidante natural más importante (Lawson, 1994). La manteca de cerdo, sebo y otras mantecas frecuentemente se estabilizan mediante la adición de antioxidantes, ya que no contienen antioxidantes naturales. Dos de los antioxidantes más importantes comercialmente son el hidroxianisol butilado (BHA) y la butilhidroquinona terciaria (TBHQ). Estos antioxidantes son para bajas temperaturas, y no proporcionan protección a las grasas y aceites a temperaturas de fritura debido a su tendencia a destilar debido al calor (Lawson, 1994).

Índice de yodo

El índice de yodo (IY) es el número de miliequivalentes o partes de yodo absorbido por 100 partes de peso de sustancia. Este valor da una *idea del número de insaturaciones de los ácidos grasos* en el aceite. Un aceite totalmente saturado poseerá un IY = 0, mientras que a mayor cantidad de insaturaciones se fijará en ellos una cantidad proporcional de yodo, incrementándose este índice (Arango, 2002).

El grado de insaturación del aceite es importante, en primer lugar, porque está relacionado con el punto de fusión del mismo. A mayor cantidad de insaturaciones, el punto de fusión del aceite será menor. Sin embargo, como los aceites naturales están compuestos por diversos ácidos grasos (saturados e insaturados) con distintos puntos de fusión, ellos solidifican en realidad en un rango amplio de temperaturas. Dado que las insaturaciones de los ácidos grasos se mantienen luego de la transesterificación, el punto de fusión del biodiésel está relacionado al del aceite de procedencia.

En segundo lugar, a mayor grado de insaturación (mayor índice de yodo) del aceite se obtendrá un biodiésel con menor índice de cetano, propiedad importante para la calidad de la combustión en el motor (Mittelbach, 1996). En la Tabla 4.5 se observan los índices de yodo, números de cetano y puntos de fusión de algunos aceites y grasas comunes y sus metil-ésteres.

Tabla 4.5: Índices de yodo y características relacionadas de algunos aceites y grasas

Aceite o grasa	Índice de yodo promedio	Número de cetano	Punto de fusión (°C)	Punto de fusión del metil-éster (°C)
Aceite de linaza	183	34,6	-24	
Aceite de soya	37,9	-16		-10
Aceite de girasol	126	37,1	-17	-12
Aceite de semilla de algodón	105	41,8	-1	-5
Aceite de colza	104	37,6	-10	
Aceite de maní	93	41,8	3	85
Aceite de palma	54	65	35	14
Sebo de vaca	42	75	37,5	16
Aceite de palmiste	37	70	24	-8

Fuentes: Índices de yodo de Calais y Clark (2000), Gunstone et al., (1994), Applewhite (1980). Puntos de fusión de Calais y Clark (2000). Número de cetano de Goering et al., (1982). Propiedades del sebo de res de Ali et al., (1995).

En tercer lugar, los aceites insaturados tienden a oxidarse más fácilmente debido a la escasez de átomos de hidrógeno en su composición. En los puntos donde se encuentran las insaturaciones, las cadenas son atacadas por el oxígeno, dando lugar a la formación de peróxidos y, a partir de éstos, de polímeros entre las distintas cadenas de ácidos grasos. Estos polímeros, en el biodiésel, llevan a la formación de depósitos sólidos en el motor o al deterioro del aceite lubricante. Este efecto se incrementa a mayor cantidad de insaturaciones presentes en el ácido graso, y por lo tanto a mayor índice de yodo (Mittelbach, 1996).

Índice de saponificación

El valor o índice de saponificación de un aceite es el número de miligramos de hidróxido de potasio (KOH) necesarios para saponificar 1g de aceite completamente. Dado que los aceites están formados por triglicéridos principalmente, y que cada triglicérido necesita 3 moléculas de KOH para saponificarse, el índice de saponificación puede ser *usado para estimar aproximadamente el peso molecular promedio del aceite utilizado*.

Material insaponificable

El material insaponificable comprende *todos los compuestos que contiene el aceite o grasa que no reaccionan con KOH para producir jabones, es decir, que no son ácidos grasos o glicéridos pero que son solubles en solventes orgánicos (y no en agua)*. Consiste principalmente en aceites minerales, pigmentos, esteroides, tocoferoles y fosfolípidos.

Entre las materias insaponificables más comúnmente encontradas en aceites y grasas están diferentes compuestos que contienen *fósforo*, como fosfolípidos y fosfátidos. El fósforo frecuentemente forma parte de moléculas de *lecitina*, que es un muy buen *emulsificante* (sustancia que favorece la formación de mezclas estables entre grasas o aceites y agua).

Entonces, si el aceite tiene un alto contenido de fósforo, se formarán emulsiones durante el proceso de decantación (separación de la glicerina luego de la transesterificación) y durante el lavado del biodiésel, lo cual lleva finalmente a pérdidas en el rendimiento del proceso. En teoría, un contenido de hasta 20 ppm de fósforo es aceptable para la producción de biodiésel, sin embargo, la experiencia en diversas plantas en Europa muestra que niveles de 3 a 4 ppm son adecuados, y con 5 a 6 ppm ya se presentan problemas mayores de emulsión. Un control de este parámetro en cada lote de aceite recibido para la producción de biodiésel es altamente recomendable (Matthys, 2003).

Insolubles y agua

El contenido de insolubles del aceite debe mantenerse lo más bajo posible (menor a un 0,8% para que el biodiésel cumpla con las especificaciones europeas). Estas sustancias no participan en el proceso de transesterificación, pero permanecen en el éster (el biodiésel), y representan impurezas en el combustible (Matthys, 2003).

El contenido de agua en un aceite es importante porque el agua produce la *hidrólisis* de los triglicéridos: reacciona con las uniones entre el glicerol y los ácidos grasos y las

rompe, produciendo ácidos grasos libres, mono- y diglicéridos y/o glicerol. La hidrólisis resulta acelerada por las altas temperaturas y presiones y una excesiva cantidad de agua. Esta reacción es especialmente importante en la preparación de alimentos fritos en profundidad, donde la grasa de fritura puede estar a una temperatura de 177°C y el alimento que se fríe tiene un alto contenido de agua. Un buen ejemplo de esta situación es la fritura de las papas fritas. Las papas frescas tienen un contenido de agua elevado, sobre el 80% de su peso antes del cocinado, y durante la fritura pueden generarse ácidos grasos libres a una velocidad bastante rápida (Lawson, 1994).

Tabla 4.6: Principales características fisicoquímicas de algunos aceites y grasas

Aceite o grasa	Principales ácidos grasos presentes	Viscosidad a 38°C mm ² /s	Índice de yodo (g/100g)	Índice de saponificación (mg KOH/g)	Materia insaponificable (%)
Soya	53% linoleico 23% oleico 12% palmítico 8% linoléico	32,6	125 – 140	190 – 194	1,00
Semilla de algodón	53% linoleico 24% palmítico 18% oleico	33,5	110	192 – 200	1,50
Girasol	59% linoleico 34% oleico	37,1	133	189 – 194	1,30
Palma	48% palmítico 38% oleico 9% linoleico		50	196 – 206	0,30
Coco	49% láurico 18% mirístico 8% caprílico 8% palmítico		10	252 – 260	0,40
Canola	62% oleico 22% linoleico 10% linoléico	37	100	170 – 180	1,00
Manteca de cerdo	45% oleico 25% palmítico 13% esteárico 10% linoleico				
Sebo de vacuno	39% oleico 26% palmítico 22% esteárico	51,2	35 – 48		
Ricino	88% ricinoleico 8% oleico	297	85	177 – 187	0,50

Fuentes: Dorsa (2004); Lawson (1994); Goering et al., (1982).

Durante la transesterificación, la presencia de agua puede causar la saponificación de los ésteres y consumir el catalizador, reduciendo su eficiencia. La presencia de agua tiene un efecto aún más negativo que la de ácidos grasos libres, y según Ma *et al.*, (1998), debe mantenerse por debajo de un 0,06%.

4.1.6 ¿EL ACEITE IDEAL?

A modo de resumen para esta parte, en la Tabla 4.7 se presenta una visión general de las principales características de los aceites y sus implicancias para la producción de biodiésel y su calidad.

Tabla 4.7: Características de los aceites y producción de biodiésel

Efectos sobre el proceso de producción		
Índice de acidez	Alta acidez interfiere en la transesterificación alcalina, produciendo jabones	Definen tipo de pretratamiento
Contenido de fósforo	Genera emulsiones durante la producción y purificación del biodiésel	
Contenido de agua	Genera hidrólisis del aceite, producción de AGL y, en presencia del catalizador, producción de jabones	
Efectos sobre la calidad del biodiésel mismo		
Índice de peróxido	Alto IP indica proceso de oxidación en marcha. Biodiésel ya en proceso de degradación oxidativa	
Índice de yodo	Alto IY puede indicar menor punto de fusión y mejores propiedades de flujo en frío. Bajo IY indica mejor estabilidad a la oxidación y polimerización (menor riesgo de formación de sólidos), y mayor número de cetano (mejor calidad de combustión).	
Contenido de insolubles	Insolubles en el aceite resultan en insolubles en el biodiésel, que pueden causar problemas en el motor	

No es posible llegar a una generalización tal que se pueda indicar un aceite que sea el ideal para la producción de biodiésel. Hay muchos factores importantes, no solo de carácter técnico, sino también económico, social y ambiental.

En el aspecto técnico, las características recomendables para el aceite serían:

- ▶ Bajo contenido de ácidos grasos libres, para simplificar el proceso (evitar tratamientos previos), maximizar su eficiencia y rendimiento y reducir las pérdidas en forma de jabones.
- ▶ Bajo contenido de insaponificables (especialmente gomas y fosfolípidos), que pueden

dar lugar a menores rendimientos en la producción de biodiésel y a formación de impurezas y depósitos durante su combustión en el motor.

► Bajo contenido de agua (problema que puede existir cuando se trabaja con aceites usados), ya que el agua favorece la formación de ácidos grasos libres y de jabones.

► Bajo contenido de fósforo, para evitar emulsiones durante el proceso de producción y purificación del biodiésel, y de insolubles que constituyen impurezas en el combustible.

► Bajo índice de yodo, siempre y cuando el clima del lugar donde será utilizado el biodiésel lo permita. Cuando menor sea el índice de yodo, mayor será la estabilidad del combustible, y éste podrá ser almacenado durante más tiempo tanto antes de su uso como en el mismo motor sin sufrir degradación. Pero a menor índice de yodo, el combustible empezará a cristalizar (solidificar) a mayores temperaturas, impidiendo su uso en climas fríos.

► A igual índice de yodo, dar preferencia a los aceites con ácidos grasos monoinsaturados que a aquellos con ácidos poliinsaturados.

► No se requiere obligatoriamente utilizar un aceite totalmente refinado, ya que muchos de los pasos de la refinación del aceite para fines comestibles (como la desodorización o el blanqueado) son innecesarios al momento de producir biodiésel, y sólo añadirían a los costos del combustible. Los procesos de refinamiento que sí son necesarios son los de refinación química: neutralización y desgomado del aceite (Matthys, 2003).

4.2 INSUMOS: CATALIZADORES Y ALCOHOLES

4.2.1 EL ALCOHOL

El alcohol es el principal insumo para la producción de biodiésel. En volumen, representa alrededor del 10-15% de los insumos consumidos.

Los alcoholes que más comúnmente se utilizan para producir biodiésel son *metanol* y *etanol*. Se puede utilizar otros alcoholes – propanol, isopropanol, butanol y pentanol – pero estos son mucho más sensibles a la contaminación con agua (es decir, la presencia de agua en mínimas cantidades inhibe la reacción) (Bradshaw, 1942).

El metanol es tóxico cuando se ingiere, se inhala o al contacto con la piel, y además altamente inflamable – sus gases se encienden a una temperatura de 12°C. Por encima de esta temperatura las mezclas de aire y vapor de metanol (con al menos 6% de metanol) son explosivas. Existe riesgo de explosión e incendio cuando el metanol está expuesto al calor, chispas, llamas o descargas de energía estática. Además, el metanol arde con una llama incolora, de manera que no es fácil notar si se enciende. Medidas de seguridad contra incendios son necesarias al trabajar con metanol, así como adecuada ventilación y etiquetado, sistemas cerrados de manipulación y equipamiento de protección personal para evitar el contacto, inhalación o ingestión de este alcohol.

El etanol es menos tóxico – aunque puede tener efectos negativos (ebriedad, coma etílico) cuando se ingiere en grandes cantidades – pero también es altamente inflamable. Su uso requiere de menores medidas de seguridad ocupacional, pero sí de seguridad contra incendios. La desventaja de su uso para producir biodiésel es que es mucho menos reactivo que el metanol, y la transesterificación se ve afectada principalmente por cualquier cantidad de agua presente en los insumos. Se requiere entonces que el etanol utilizado tenga una pureza superior al 99%, y que los otros insumos (aceite y catalizador) sean igualmente de muy alta pureza. Es por esto que en la mayoría de plantas de producción de biodiésel aún se utiliza metanol pese a su toxicidad.

Cabe mencionar además que el metanol se obtiene principalmente de fuentes fósiles no renovables: del gas natural o gas metano. También es posible obtenerlo mediante destilación seca de la madera, pero este proceso aún no se aplica a gran escala. El etanol, en cambio, proviene de materias primas renovables: caña de azúcar, remolacha azucarera, papa, otros vegetales celulósicos, etc.

Una de las variables más importantes que afectan el rendimiento de la transesterificación es la *razón molar* entre el alcohol y los triglicéridos. Por razón molar se entiende la cantidad de moléculas de alcohol necesarias para reaccionar con una molécula de triglicérido o aceite. Como vimos en la Figura 4.1, se requieren 3 moléculas de alcohol y una de triglicérido para producir 3 moléculas de biodiésel y una de glicerol. Sin embargo, la transesterificación es una *reacción de equilibrio reversible*, es decir, se necesita un gran exceso de alcohol para forzar la reacción hacia la derecha (es decir, hacia los productos buscados, biodiésel y glicerol). Por esto, en la práctica, cuando se trabaja con metanol se recomienda una razón molar de 6:1 para asegurar una conversión máxima de los triglicéridos a ésteres (Freedman *et al.*, 1984). En el caso del etanol, algunos estudios indican que una razón molar de 9:1 sería la más apropiada (Meher, 2006). Si la cantidad de alcohol no es suficiente, el producto contendrá monoglicéridos y diglicéridos (productos intermedios de la transesterificación), los cuales cristalizan muy fácilmente en el biodiésel y pueden causar taponamiento de los filtros y otros problemas en el motor.

Tabla 4.8: Metanol, transesterificación y razón molar

	Metanol	Aceite de palma
Fórmula	CH ₃ OH	-
Peso molecular	32 u	807 u
Peso de 1 mol de producto	32 g	807 g
Razón molar recomendada: 6:1	6 moles	1 mol
Peso requerido para reacción (g)	192	807
Relación en peso (g)	1	4,2
<i>Es decir, por cada 4,2 g de aceite de palma se requiere 1 g de metanol para que la reacción sea completa.</i>		

Tabla 4.9: Etanol, transesterificación y razón molar

	Etanol	Aceite de palma
Fórmula	CH ₃ CH ₂ OH	-
Peso molecular	46 u	807 u
Peso de 1 mol de producto	46 g	807 g
Razón molar recomendada: 9:1	9 moles	1 mol
Peso requerido para reacción (g)	414	807
Relación en peso (g)	1	1,9
<i>Es decir, por cada 1,9 g de aceite de palma, se requiere 1 g de etanol para que la reacción sea completa.</i>		

4.2.2 EL CATALIZADOR

La transesterificación de los triglicéridos puede ser realizada mediante diferentes procesos catalíticos. Los catalizadores utilizados pueden ser clasificados de la siguiente manera:

- ▶Catalizadores alcalinos – hidróxido de sodio (NaOH), hidróxido de potasio (KOH), metilato de sodio (NaOMe).
- ▶Catalizadores ácidos – ácido sulfúrico, ácido fosfórico, ácido clorhídrico, ácido sulfónico.
- ▶Catalizadores enzimáticos – lipasas
- ▶Catalizadores heterogéneos – catalizadores en fase sólida.

El proceso más conocido, utilizado y hasta el momento más efectivo es el que emplea catalizadores alcalinos (Ma y Hanna, 1999). Sin embargo, si el aceite tiene un alto contenido de ácidos grasos libres, la catálisis alcalina no es apropiada debido a que los hidróxidos reaccionan con los ácidos grasos formando jabones, lo cual reduce el rendimiento de producción de biodiésel. En este caso, se requiere otro tipo de transesterificación, o un pretratamiento con catalizadores ácidos. Estos procesos se discutirán con mayor detalle en el Capítulo 5.

Catalizadores alcalinos

En el caso de la catálisis alcalina, es muy importante que los catalizadores se mantengan en un estado anhidro. Debe evitarse su contacto prolongado con el aire, pues éste disminuye su efectividad debido a la interacción con la humedad y con el dióxido de carbono (Meher, 2006). Los tres catalizadores cáusticos tienen ventajas y desventajas, que describiremos a continuación, y su elección depende de cada caso concreto.

- ▶**Hidróxido de sodio (NaOH):** el NaOH viene en forma de cristales que deben ser disueltos en el metanol antes de la transesterificación. Es un producto muy barato y fácil de conseguir, pero es cáustico e irritante, y su manipulación directa sin protección res-

piratoria y para la piel debe evitarse. Al igual que en el caso del KOH, la manipulación de este insumo sólido puede ser complicada (especialmente en plantas de producción grandes, donde se quieren evitar operaciones manuales). Además, el NaOH es muy higroscópico (absorbe humedad del ambiente), lo cual hace que los cristales se peguen entre sí y sean más difíciles de manipular, y además reduce su eficacia. Finalmente, la reacción con el metanol es exotérmica, genera calor, y el tanque donde se realiza esta disolución debe mantenerse refrigerado para evitar que se evapore el alcohol (causando pérdidas de este insumo y riesgos de incendio y para la salud de los trabajadores) (Matthys, 2003).

► **Hidróxido de potasio (KOH):** muy similar al hidróxido de sodio, el hidróxido de potasio viene también en forma de cristales que deben ser disueltos en el metanol antes de la transesterificación. Es un producto barato y disponible en la mayoría de lugares. Debido a su mayor peso molecular, se necesita mayor cantidad de KOH que de NaOH para hacer el mismo trabajo, lo cual puede elevar costos (Matthys, 2003). Las dificultades de operación y riesgos son similares a los que existen con NaOH, sin embargo, algunos estudios han demostrado que utilizando KOH se obtienen mejores rendimientos de transformación que con NaOH (Tomasevic y Marinkovic, 2003). Además, el KOH se disuelve más fácilmente que el NaOH en el metanol, lo cual facilita el primer paso previo a la transesterificación. Los jabones de potasio son líquidos, a diferencia de los de sodio que son sólidos. Esto hace que el glicerol crudo sea más fácil de drenar luego de la separación del biodiésel cuando se trabaja con KOH. Por otra parte, las sales de potasio obtenidas como subproducto de la purificación de la glicerina pueden ser utilizadas como fertilizante agrícola, lo cual no es el caso con las sales de sodio.

► **Metilato de sodio:** El metilato de sodio no está disponible en estado puro, debido a que es muy inflamable. Se presenta entonces comercialmente como una solución al 30% en metanol. Esta solución es un líquido, lo cual constituye la principal ventaja: su manipulación (pese a su alta inflamabilidad y toxicidad) es sencilla, puede ser adaptada a un proceso continuo y realizarse mecánicamente sin necesidad de intervención de los operarios (Matthys, 2003). Algunos estudios arrojan que el metilato es un catalizador más efectivo que los anteriores (Matthys, 2003, Freedman *et al.*, 1986), pero otros indican que NaOH es mejor que NaOMe (Ma *et al.*, 1998). Igualmente, algunos autores indican que al utilizarse menor cantidad de metilato, al final quedan menos sales de sodio disueltas en el glicerol, lo cual hace su purificación más sencilla (Matthys, 2003). Otros, en cambio, mencionan que este catalizador causa la formación de diferentes subproductos, principalmente sales de sodio, que deben ser tratados como residuos, y que además requiere utilizar aceite de alta calidad (Ahn *et al.*, 1995). En conclusión, el metilato de sodio parece ser un muy buen catalizador con materias primas adecuadas, pero su costo es alto y su disponibilidad limitada (Matthys, 2003).

Catalizadores ácidos

Los catalizadores ácidos pueden ser utilizados tanto para la esterificación de ácidos grasos libres – con el fin de convertirlos directamente en ésteres – o para la transesterificación de los triglicéridos. Cuando la materia prima es un aceite con alto contenido de ácidos

grasos libres (AGL), la esterificación ácida está recomendada como un primer proceso para tratar estos AGL, pero debe ser seguida por la transesterificación alcalina (con NaOH o KOH como catalizadores) para convertir los triglicéridos subsistentes.

Los catalizadores ácidos también pueden ser utilizados directamente para la transesterificación, pero esta reacción es extremadamente lenta (Bradshaw, 1942) y requiere de un exceso aún mayor de alcohol, lo cual la torna poco económica.

Catalizadores enzimáticos

A pesar de que la transesterificación utilizando catalizadores alcalinos permite una alta tasa de conversión en tiempos de reacción lentos, este proceso tiene algunos inconvenientes:

- ▶ Consume alta energía (calor y agitación constantes durante todo el proceso)
- ▶ La recuperación del glicerol es difícil, ya que es contaminado por las sales producidas por los catalizadores
- ▶ El catalizador (ácido o básico) debe ser removido del combustible, requiriendo un proceso de purificación y lavado posterior a la transesterificación
- ▶ Se producen efluentes (aguas residuales) alcalinos, que deben ser tratados antes de verterlos a los desagües
- ▶ La presencia de ácidos grasos libres y/o agua interfiere con la reacción (Meher, 2006).

Los catalizadores enzimáticos como las lipasas (enzimas que en los seres vivos están encargadas de descomponer las grasas para permitir su digestión y asimilación) son capaces de catalizar la transesterificación de los triglicéridos superando los problemas mencionados arriba. Especialmente, el glicerol puede ser removido fácilmente, los ácidos grasos libres pueden ser convertidos totalmente en ésteres, y la presencia de agua no es problemática. Sin embargo, los costos de producción de las lipasas aún son mucho más caros que los de los catalizadores alcalinos (Fuduka *et al.*, 2001; Meher, 2006).

Existen dos tipos de catalizadores enzimáticos (Marchetti *et al.*, 2006):

- ▶ Enzimas extra celulares (es decir, que han sido extraídas de las células vivas que las producen y posteriormente purificadas)
- ▶ Enzimas intracelulares (es decir, que aún están dentro de las células que las producen. En este caso, son organismos vivos – ciertas bacterias – los que estarían realizando la catálisis).

Según Pérez (2003), algunas ventajas de utilizar lipasas como catalizadores para la producción de biodiésel son:

- ▶ Se pueden regenerar y reutilizar luego de la reacción (simplemente el residuo sólido se deja en el reactor).
- ▶ Esto permite una alta concentración de la enzima, lo cual ayuda a una mejor reacción.
- ▶ La separación y purificación del biodiésel es más sencilla, ya que no tiene que eliminarse ningún componente alcalino o ácido.

Algunas desventajas son, en cambio:

- ▶ El mayor costo de este catalizador.
- ▶ Algunos estudios han reportado que la reacción con lipasas no llega a ser lo suficientemente completa como para cumplir con los estándares de calidad del biodiésel. Sistemas de inmovilización de la enzima y/o el uso de múltiples enzimas en secuencia podrían mejorar este aspecto (Van Gerpen, 2005).
- ▶ El riesgo de que el metanol inactive a las enzimas. Esto se supera añadiendo el alcohol por partes (Nelson *et al.*, 1996; Shimada *et al.*, 2002), o utilizando co-solventes que ayuden a disolver el metanol en el aceite (Li *et al.*, 2006).
- ▶ El riesgo de que el glicerol inactive a las enzimas al acumularse y cubrirlas. Las soluciones propuestas han sido añadir sílica gel para absorber el glicerol, lavar las enzimas periódicamente con solventes orgánicos para remover el glicerol, o usar un co-solvente que ayude a diluir el glicerol (Li *et al.*, 2006).

Catalizadores heterogéneos

Los catalizadores heterogéneos son aquellos que se encuentran en una fase diferente a la de los reactantes. Es decir, que no se encuentran disueltos en el alcohol o aceite, sino que son sólidos, y por lo tanto fácilmente recuperables al final de la reacción.

Este tipo de catalizadores permiten superar algunos de los principales problemas de los catalizadores homogéneos como el hidróxido de sodio o potasio, o el metilato de sodio: los procesos de purificación del biodiésel para separar los restos de catalizador, y los de tratamiento de efluentes contaminados con los catalizadores (Bournay *et al.*, 2005).

Algunos de los primeros catalizadores sólidos probados fueron óxidos de estaño, magnesio y zinc, pero ellos actúan finalmente de forma similar a los catalizadores homogéneos, pues terminan convertidos en jabones metálicos o gliceratos metálicos. El uso de un óxido mixto de zinc y aluminio permite la transesterificación sin que haya pérdida del catalizador. Durante esta reacción, se requiere mayor temperatura y presión que en la transesterificación alcalina convencional, y además se realiza en dos etapas para alcanzar niveles de reacción máximos. El biodiésel obtenido cumple con las especificaciones de calidad de la norma europea (Bournay *et al.*, 2005).

Como ventajas del proceso, la purificación del biodiésel sólo requiere la evaporación del metanol sobrante y la adsorción del glicerol, sin necesidad de lavado con agua. Asimismo, el glicerol producido es incoloro, de una pureza del 98%, sin presencia de cenizas u otros componentes inorgánicos. Las principales impurezas en el glicerol son agua, metanol y ésteres orgánicos. Esta mayor calidad otorga un valor agregado a este subproducto, que puede ayudar a mejorar la rentabilidad de la producción de biodiésel (Bournay *et al.*, 2005).

Biodiésel: PROCESOS DE PRODUCCIÓN

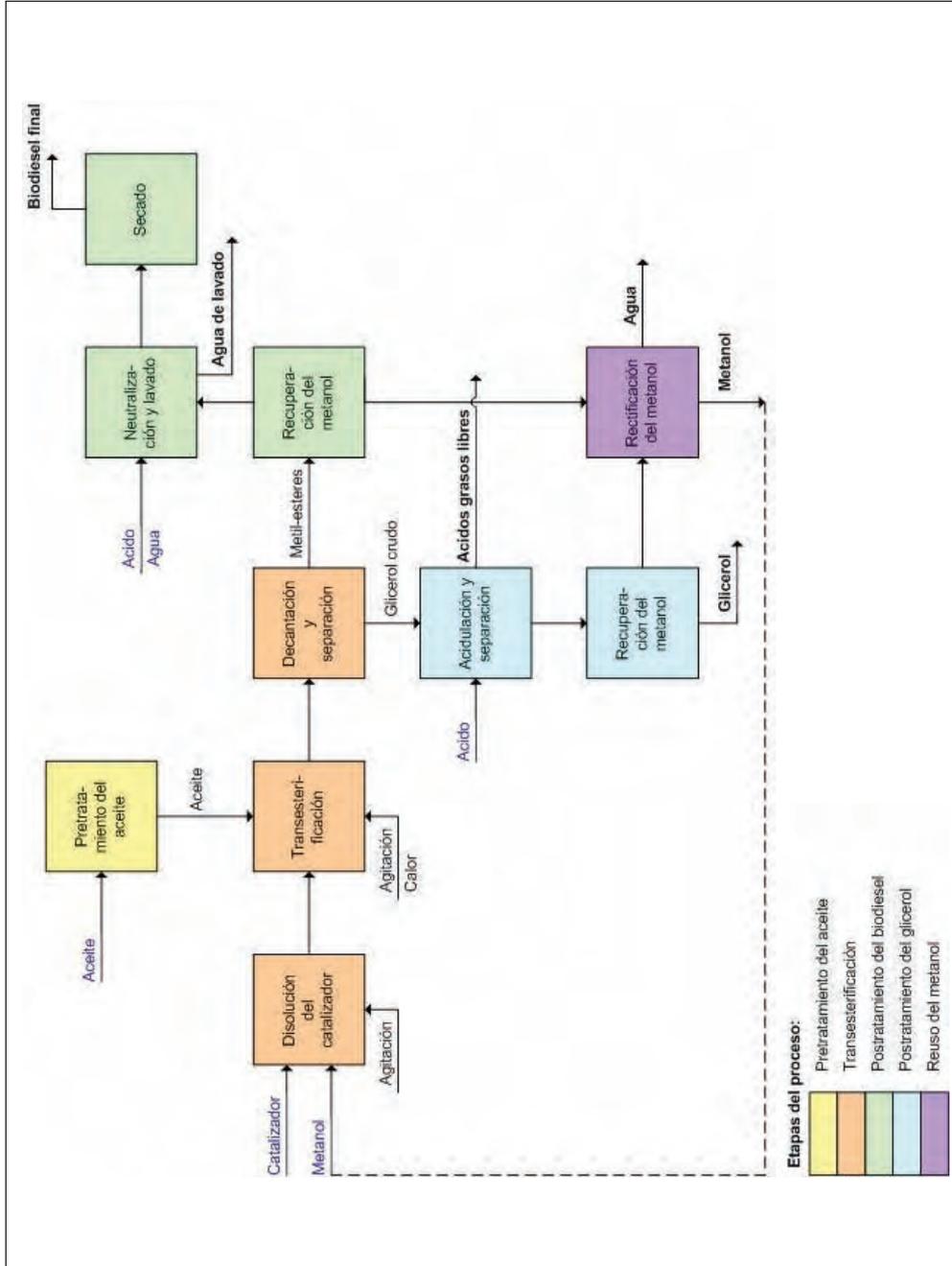
En este capítulo explicaremos el propio proceso de producción del biodiésel: la transesterificación, incluyendo los pasos necesarios de pretratamiento del aceite para asegurar su calidad adecuada, así como los de postratamiento del biodiésel para purificarlo de manera que cumpla con sus especificaciones técnicas. También se hace mención a los subproductos del proceso, especialmente la glicerina. Finalmente, se describen brevemente algunas tecnologías más avanzadas de transesterificación y producción de biocombustibles líquidos.

5.1 TRANSESTERIFICACIÓN ALCALINA

La transesterificación alcalina es el proceso más simple y más utilizado para fabricar biodiésel. Sin embargo, requiere de un aceite con bajo contenido de ácidos grasos libres, agua y otras impurezas, o de procesos adicionales de pretratamiento de la materia prima para asegurar esta calidad. Además, requiere de pasos posteriores de postratamiento del biodiésel para reducir su contenido de impurezas procedentes del proceso, principalmente restos de catalizador, y de postratamiento de la glicerina para purificarla parcialmente e incrementar su valor de mercado. Es por esto que otros procesos han sido desarrollados para aceites menos puros, para mejorar el rendimiento de la transesterificación, o para intentar acelerarla, pero sin embargo su uso aún no está generalizado.

En los siguientes párrafos describiremos las etapas del proceso de producción de biodiésel por transesterificación alcalina, que se pueden observar en la Figura 5.1.

Figura 5.1: Proceso de producción de biodiésel por transesterificación alcalina



5.1.1 PRETRATAMIENTO DEL ACEITE

La mayor parte del biodiésel se produce a partir de aceites comestibles semi-refinados con buenas características de acidez y humedad. Sin embargo, existe gran cantidad de aceites y grasas de menor calidad – y menor costo – que también podrían ser convertidos en biodiésel (por ejemplo, aceites vegetales crudos, grasas animales y aceites usados o residuales). El problema para procesar estas materias primas baratas es que suelen tener grandes cantidades de ácidos grasos libres (ver Tabla 5.1), gomas, humedad y otras impurezas que afectan el proceso de transesterificación alcalina.

Tabla 5.1: Acidez aproximada de algunas materias primas baratas

Materia prima	Rango de acidez
Aceites de cocina usados	2 – 7%
Grasas animales	5 – 30%
Grasas de trampas de grasa	Cerca de 100%

Fuente: Van Gerpen, 2005

Por eso, el aceite para producir biodiésel debe ser refinado parcialmente, con el objetivo de:

- ▶ Eliminar gomas, que podrían resultar en formación de emulsiones durante el proceso.
- ▶ Eliminar fosfátidos, de manera que los efluentes del proceso no tengan fosfatos y se reduzcan sus costos de tratamiento.
- ▶ Eliminar ácidos grasos libres, para facilitar la transesterificación y posteriormente la purificación de la glicerina.
- ▶ Eliminar ceras, para mejorar el desempeño en frío del biodiésel.
- ▶ Eliminar otros contaminantes, y obtener una mejor calidad de la glicerina (Westfalia Separator Food Tec, 2006).

Esta refinación parcial (pretratamiento) puede incluir los siguientes procesos:

- ▶ Desgomado (en los aceites que tienen gomas, como el de soya y semilla de algodón)
- ▶ Neutralización (en los aceites con alta acidez, como el de palma)
- ▶ Lavado (para eliminar residuos de la neutralización)
- ▶ Secado (para eliminar el contenido de agua).

Si la acidez del aceite es muy alta, la neutralización no es conveniente porque implica la pérdida de los ácidos grasos libres en forma de jabones. Entonces, el proceso de refinación sugerido es:

- ▶ Desgomado
- ▶ Esterificación ácida
- ▶ Secado.

Finalmente, para mejorar las propiedades de flujo en frío del biodiésel, se puede requerir un proceso de fraccionamiento o *winterización*, con el fin de separar las fracciones con mayores puntos de fusión del aceite.

Desgomado

El desgomado con agua es la forma más simple de reducir la cantidad de fosfolípidos y fosfátidos en los aceites. El aceite se calienta a aproximadamente 90°C, se agrega pequeñas cantidades de agua para hidratar las gomas y hacerlas insolubles en el aceite. La cantidad de agua a usar debe ser similar al peso seco de las gomas a remover. Después de unos 5 minutos las gomas hidratadas pueden ser removidas por centrifugación. Las impurezas que se pueden eliminar por este método son fosfátidos hidratables, triglicéridos ocluidos y otros compuestos solubles en agua como azúcares (Dorsa, 2004; Lawson, 1994).

El proceso arriba descrito sólo permite la remoción de las gomas hidratables. Por eso, a veces se utiliza ácido cítrico y/o ácido fosfórico para mejorar la velocidad y la eficacia del proceso y permitir la separación de las gomas no hidratables. El ácido puede estar disuelto en agua para facilitar la separación y luego el aceite es lavado con agua (Dorsa, 2004; Lawson, 1994).

Neutralización, lavado y secado

Aceites con un contenido de hasta 5% de ácidos grasos libres pueden ser procesados con catálisis alcalina añadiendo mayor cantidad de catalizador para compensar las pérdidas en el jabón. El jabón que se produce es eliminado en el glicerol y/o durante el proceso de lavado con agua, y la única desventaja de este proceso es la pérdida de materia prima en jabones en lugar de biodiésel. Aceites con más del 5% de AGL no pueden ser transesterificados por catálisis alcalina, porque los jabones inhibirían la separación del biodiésel de la glicerina y además llevarían a la formación de emulsiones durante el lavado (Van Gerpen, 2005). Para superar este problema existen dos alternativas: la neutralización del aceite o la esterificación ácida de los ácidos grasos libres.

La neutralización consiste en hacer reaccionar el aceite con una sustancia alcalina como el hidróxido de sodio para eliminar los ácidos grasos libres, responsables de su acidez. El aceite se calienta a 85°C (en caso de aceites muy ácidos a 65°C) y se aplica hidróxido de sodio diluido en una cantidad tal que neutralice los ácidos en el aceite y con un exceso que favorezca la separación de los jabones y evite la formación de emulsiones. Este exceso puede variar entre 10% y 30% para aceites de baja acidez (hasta 1%) y entre 30% y 50% para aceites de alta acidez.

Cuando el álcali reacciona con los AGL, el resultado es un jabón:



Este jabón se separa luego centrifugando la mezcla de grasa y jabón. Después, el aceite o grasa se lava con agua una o dos veces para eliminar las últimas trazas de jabón y se centrifuga nuevamente. Finalmente, el material refinado se seca en un secador de vacío para eliminar el agua residual (Dorsa, 2004; Lawson, 1994).

Aunque la finalidad del tratamiento con álcalis es la eliminación de los ácidos grasos libres, este proceso puede dar lugar también a una reducción significativa del contenido de fosfolípidos y de la materia coloreada (Fennema, 1993).

Existen asimismo procesos de neutralización en frío, con los que los aceites que contienen ceras (como el de girasol) pueden ser al mismo tiempo neutralizados y winterizados. Este proceso previene la formación de sólidos en el biodiésel a bajas temperaturas (Westfalia Separator Food Tec, 2006).

Esterificación ácida de los ácidos grasos libres (AGL)

La esterificación ácida es otra manera de «deshacerse» de los ácidos grasos libres en el aceite, pero permite, al contrario de la neutralización, reaprovecharlos para producir biodiésel también a partir de ellos (Meher, 2006). Esta reacción funciona de la manera siguiente:



Al aceite caliente se agrega metanol en cantidad adecuada para reaccionar con los AGL, utilizando ácido sulfúrico como catalizador. Luego de la reacción, se separa el agua mediante decantación o centrifugación, y lo que queda es una mezcla de aceite (triglicéridos) y biodiésel con menos de 1% de ácidos grasos libres. Con esta mezcla ya se puede realizar una transesterificación alcalina tal como se describirá en la siguiente sección.

Una de las dificultades de este proceso es la presencia de agua. La acumulación de agua que se va produciendo durante la esterificación puede llegar a detener la reacción antes de que sea completa. Para solucionar este problema es necesario trabajar en dos o más etapas para ir separando el agua antes de continuar la esterificación (Van Gerpen, 2005).

Otra desventaja es la gran cantidad de metanol necesaria: mientras que con la catálisis alcalina se requiere una cantidad de 6 moles de alcohol por cada mol de triglicérido (razón molar de 6:1), algunos autores han encontrado que con la catálisis ácida se necesita entre 30:1 y 50:1 (Zhang *et al.*, 2003).

Finalmente, otro problema es el uso de ácido sulfúrico: este insumo, por su alta corrosividad, requiere de tanques con materiales costosos (acero inoxidable de muy alta calidad), y además su utilización produce efluentes ácidos contaminantes (Wang *et al.*, 2006). Es por esto que la esterificación ácida se justifica sólo si las materias primas a utilizar tienen un contenido de AGL realmente alto.

Wang *et al.* (2006) propusieron el uso de sulfato férrico como catalizador para la esterificación ácida. En sus experimentos, encontraron que este catalizador es ventajoso porque es sólido (catalizador heterogéneo), de manera que es fácilmente separable de los productos, es reutilizable y no contamina los efluentes (por la misma razón). También es más eficiente que el ácido sulfúrico: Con una cantidad de catalizador de 2% en peso, una razón molar de 10:1 de metanol a triglicéridos (mucho menor a la necesaria cuando se trabaja con ácido sulfúrico) y una temperatura de reacción de 95°C, se alcanzó una conversión de 97% de los ácidos grasos libres de un aceite usado en biodiésel. Además, el sulfato férrico no requiere de equipamiento tan costoso porque es menos corrosivo.

Filtrado y secado

Si la materia prima es algún aceite crudo, o aceite usado previamente en frituras, es posible que contenga humedad e impurezas sólidas. Para el caso de la humedad, es necesario secar el aceite mediante evaporación al vacío o mediante el uso de sales absorbentes. Para separar las impurezas sólidas, basta un proceso de filtrado en caliente antes de la transesterificación.

Winterización

La winterización es un método para la eliminación de ciertos constituyentes (ceras, o triglicéridos mismos), que aunque solubles a temperaturas media y alta, cristalizan y enturbian el aceite en climas fríos. El proceso consiste en enfriar el aceite por cierto periodo y filtrarlo en un filtro-prensa o con filtros de baja presión a temperaturas que estén un par de grados por debajo de aquellas a las que el aceite se enturbia. El aceite se enfría con agua fría o salmuera, o enfriando el aire del edificio donde esté almacenado. El enfriamiento debe ser muy lento para lograr que se formen cristales grandes y facilitar la filtración (Andersen, 1962). En la producción de biodiésel, este proceso puede ser aplicado al aceite, o directamente al mismo biocombustible.

5.1.2 TRANSESTERIFICACIÓN

Volviendo a la reacción química de la transesterificación, hemos visto que químicamente ésta equivale a:



Sin embargo, en la práctica se necesita más de 3 alcoholes por cada triglicérido para que la reacción ocurra completamente. Si no se usa este exceso de alcohol, el producto obtenido no será biodiésel puro: consistirá en una mezcla de biodiésel, triglicéridos sin

reaccionar, y productos intermedios como los monoglicéridos y diglicéridos. Estas impurezas pueden afectar las características del combustible, de manera que no cumpla con las normas técnicas de calidad, además de tener efectos indeseados como producir depósitos carbonosos en el motor, taponeo de los filtros, combustión incompleta, etc.

Igualmente, para que la reacción se lleve a cabo, también hemos visto que se necesita la presencia de un catalizador y de ciertas condiciones de reacción (tiempo, temperatura, agitación). Asimismo, hemos visto que la calidad del aceite es uno de los condicionantes más importantes para que la transesterificación se lleve a cabo adecuadamente y que debe asegurarse con un análisis químico previo y, si es necesario, con un pretratamiento adecuado.

Los siguientes pasos de la transesterificación alcalina, tal como se aprecian en la Figura 5.1, son:

- ▶ La primera operación consiste en disolver el catalizador sólido (hidróxido de sodio o potasio - NaOH o KOH) en el alcohol (metanol o etanol). La cantidad de catalizador a utilizar depende de la acidez del aceite, pero suele variar entre un 0,5 y 1% (Srivastava y Prasad, 2000). Se necesita aproximadamente media hora de agitación constante para lograr una disolución completa. Si se trabaja con un catalizador líquido (metilato de sodio) no se requiere este paso.
- ▶ Luego se realiza la transesterificación propiamente dicha. Para ello, se necesita un reactor cerrado herméticamente, con agitación constante y calor. En plantas de producción pequeñas este proceso se realiza por lotes, pero en plantas de gran escala se realiza en reactores de flujo continuo. En este reactor se mezclan el aceite y el metanol con el catalizador disuelto y se agita durante una hora. Para que la reacción sea completa se requiere un tiempo de reacción de 1 hora a 60°C de temperatura, o de 4 horas a 32°C de temperatura (Freedman *et al.*, 1984).
- ▶ La transesterificación resulta en la separación de dos fases: una fase más viscosa y densa, que consiste en una mezcla de glicerol, jabones, catalizador, metanol y agua (denominada *glicerol crudo* en la Figura 5.1), y una fase más liviana, que consiste en los metil-ésteres (el biodiésel), también con metanol, una menor proporción de catalizador y jabones, y mono- y diglicéridos (en caso que la reacción no haya sido completa). Se requiere de un tanque decantador donde ambas fases se puedan separar por gravedad, o de una centrífuga para separarlas más rápidamente. Asimismo, se puede añadir agua luego de la transesterificación para mejorar la separación del glicerol. A partir de este punto, se separan dos líneas de proceso: una para purificar los metil-ésteres, y otra para purificar y recuperar el glicerol.

Transesterificación en dos etapas

Muchas plantas de producción, sobre todo en Europa donde los estándares de calidad para el biodiésel son más exigentes, realizan la transesterificación del aceite en dos etapas. El objetivo de este método es reducir la cantidad de metanol que interviene en la transesterificación, y mejorar la eficiencia de la reacción, consiguiendo altas tasas de transformación del aceite en biodiésel y una mayor pureza del producto.

Este proceso consiste en agregar sólo una parte de la mezcla de alcohol y catalizador en cada etapa y separar el glicerol después de cada etapa (Bradshaw, 1942). Usualmente,

se agrega primero un 80% del alcohol y catalizador al aceite, se realiza la transesterificación, se separa el glicerol, y el producto se lleva a una segunda reacción con el 20% de alcohol y catalizador restante (Van Gerpen, 2005).

Su fundamento reside en una característica importante de la reacción química de transesterificación: que es una *reacción de equilibrio*. Las reacciones de equilibrio pueden ocurrir en los dos sentidos. En el caso de la transesterificación, el aceite y el alcohol reaccionan para producir ésteres metílicos y glicerol, pero igualmente los ésteres metílicos pueden reaccionar con el glicerol para producir triglicéridos y alcohol nuevamente. Cuando se mezclan el aceite, alcohol y catalizador, la reacción transcurre hasta que alcanza un punto de equilibrio en el que ya no se generan más productos. La reacción ocurre en ambos sentidos al mismo tiempo y está en un equilibrio dinámico.

Como el objetivo del proceso es obtener la mayor cantidad de ésteres, lo ideal es desplazar lo más posible este equilibrio hacia la derecha de la reacción (es decir, hacia los productos). Hay dos maneras de hacerlo: agregar más insumos (es por esto que se utiliza una razón molar alcohol: aceite de 6:1 en lugar de 3:1), o quitar parte de los productos. Al realizar la reacción en dos etapas estamos justamente quitando uno de los productos (el glicerol) y forzando a la reacción a avanzar aún más para producir ese glicerol faltante para reestablecer el equilibrio.

Transesterificación alcalina con etanol

En muchos países se está experimentando con la transesterificación utilizando etanol en lugar de metanol. Las ventajas de este proceso serían la procedencia renovable del alcohol (caña de azúcar, remolacha, maíz, etc.) y su mucha menor toxicidad.

Sin embargo, la producción de ésteres etílicos es difícil en comparación con la de ésteres metílicos, debido principalmente a la fácil formación de emulsiones estables que dificultan severamente la separación del biodiésel y el glicerol y la purificación del biodiésel (Zhou *et al.*, 2003). Se requiere mucho mayor cuidado con la pureza de los insumos así como con los parámetros de reacción – tiempo, temperatura, agitación – para asegurar el éxito.

En Brasil, se ha experimentado con un método que usa dos catalizadores para permitir la transesterificación con etanol, con un tiempo de reacción de sólo 30 minutos (Ribeiro, 2004).

5.1.3 POSTRATAMIENTO DEL BIODIÉSEL

Luego de la transesterificación y la separación de las dos fases – biodiésel y glicerol – se requiere de un postratamiento para asegurar que el biodiésel cumpla con los estándares de calidad exigidos, pues éste aún contiene impurezas derivadas del proceso: parte del metanol en exceso, posiblemente jabones, y trazas de catalizador.

Tal como se muestra en la Figura 5.1, los metil-ésteres se someten a temperatura y vacío para evaporar el metanol y recuperarlo, y luego son llevados a un proceso de lavado para separar todas las impurezas. El lavado se realiza con agua acidulada (con ácido fosfórico o ácido cítrico) que se mezcla con el biodiésel. El ácido neutraliza el catalizador residual presente y separa los jabones que se puedan haber formado en la reacción.

Los jabones se convierten en ácidos grasos libres (que se quedan en el biodiésel) y en sales solubles en agua (Van Gerpen, 2005). Así, los restos de catalizador, jabón, sales, glicerina y metanol se quedan en el agua de lavado. Este lavado se realiza al menos dos veces con agua nueva cada vez, hasta que se halla eliminado todo el residual de catalizador alcalino y el efluente tenga un color claro.

Finalmente, los metil-ésteres lavados se secan (con calor y vacío) para separar toda el agua restante y se filtran. El producto de este proceso es el biodiésel terminado.

5.1.4 POSTRATAMIENTO DE LA GLICERINA

El glicerol crudo, que en realidad contiene solamente un 50% de glicerol, es un subproducto de poco valor en esta forma (ya que contiene gran cantidad de jabones, catalizador alcalino y metanol), y además peligroso debido al metanol. Para poder aprovecharlo, debe ser purificado de la siguiente manera:

- ▶ Primero es llevado a un proceso de acidulación (se añade ácido sulfúrico o fosfórico) para separar 3 fases: el glicerol propiamente dicho (con metanol aún disuelto), ácidos grasos libres (provenientes del aceite³⁶), y una fase sólida que consiste en sales formadas entre el catalizador alcalino y el ácido agregado en esta etapa. Si se utiliza hidróxido de potasio como catalizador de la transesterificación y ácido fosfórico para la neutralización del glicerol, la sal que se forma es fosfato de potasio, producto que puede ser utilizado como fertilizante (Van Gerpen, 2005).
- ▶ El glicerol resultante sólo necesita ser separado del metanol (mediante evaporación – temperatura y vacío – y condensación del metanol) y así tendrá una pureza de aproximadamente 85% (Van Gerpen, 2005). En esta forma ya está listo para su venta a otros procesos industriales que lo refinan aún más, o que requieran este insumo en este estado.
- ▶ El metanol recuperado tanto de los metil-ésteres como del glicerol suele contener agua derivada del proceso y por lo tanto debe ser rectificado (es decir, destilado para separarlo del agua) antes de volver a utilizarlo en el proceso. Si se está trabajando con etanol, este paso es más complejo ya que el etanol forma mezclas estables con el agua, y se requiere además de la destilación un filtro molecular para separarlos completamente (Van Gerpen, 2005).

5.2 TRANSESTERIFICACIÓN SIN CATALIZADOR: METANOL SUPERCRTICO

Como hemos visto anteriormente, la presencia de agua y ácidos grasos libres afecta la eficiencia de la transesterificación alcalina. Asimismo, el uso de catalizadores dificulta la purificación del biodiésel y el glicerol.

³⁶ Si el aceite utilizado en el proceso contenía ácidos grasos libres, éstos son convertidos a jabones durante la transesterificación y terminan en su mayor parte mezclados con el glicerol. Cuando se agrega ácido al glicerol, estos jabones se vuelven a convertir en ácidos grasos libres y sales. Los AGL pueden ser reaprovechados también para producir biodiésel, mediante la esterificación ácida descrita más arriba.

Una de las propuestas para superar estas dificultades en la transesterificación es el uso de metanol en condiciones supercríticas. Las principales ventajas de este método son (Van Kasteren y Nisworo, 2006):

- ▶ No se requiere catalizador.
- ▶ No es sensible a la presencia de agua o ácidos grasos libres.
- ▶ Los ácidos grasos libres son esterificados al mismo tiempo que el resto del aceite.

Todo esto convierte a este método en una alternativa interesante para la transesterificación de aceites usados que usualmente contienen AGL y agua.

El proceso supercrítico implica el uso de determinadas condiciones de temperatura y presión que afectan las condiciones termofísicas del metanol, tales como su constante dieléctrica, viscosidad, peso específico y polaridad, todo lo cual facilita la reacción de transesterificación (ver Tabla 5.2).

TABLA 5.2: CONDICIONES PARA LA TRANSESTERIFICACIÓN SUPERCRÍTICA CON METANOL

Variable	Proceso supercrítico	Proceso supercrítico con cosolvente
Temperatura	320°C	280°C
Presión	400 bar	128 bar
Razón molar metanol:aceite	42:1	24:1
Cosolvente	Ninguno	Propano (se recicla)

Fuente: Cao et al., 2005.

De esta manera, bajo condiciones de alta temperatura y presión se logra una conversión casi completa del aceite en biodiésel en muy poco tiempo (5-10 minutos), sin necesidad de catalizador.

A pesar de que algunos autores critican los altos costos operativos de este proceso, debido a los altos requerimientos de temperatura y presión (mayor consumo energético) y también altos costos de inversión para contar con equipamiento que resista estas condiciones de operación, Van Kasteren y Nisworo (2006) encontraron que este proceso sí sería competitivo, ya que:

- ▶ Permite aprovechar aceites comestibles usados (de bajo costo), sin necesidad de pretratamiento ácido (que también aumentaría los costos de operación e inversión).
- ▶ A pesar de los altos consumos energéticos, el tiempo de reacción es menor, lo cual compensa en cierta manera este aspecto.
- ▶ El glicerol, subproducto de la transesterificación, resulta casi puro (96,4%), lo cual le da un mayor valor de mercado que en el proceso de transesterificación alcalina (pureza de sólo un 85%).

► El biodiésel obtenido de la transesterificación solo requiere la destilación del metanol para tener una alta pureza (99,8%). Esto también reduce los costos de inversión y operación necesarios para purificar el biodiésel en la transesterificación alcalina.

5.3 CRAQUEAMIENTO TÉRMICO O PIRÓLISIS DE LAS GRASAS

El craqueamiento térmico o pirólisis es la conversión de una sustancia en otra por medio de su calentamiento a altas temperaturas (superiores a 450°C) en ausencia de oxígeno. En algunas situaciones se utilizan, además, catalizadores que ayudan a romper los enlaces químicos de las moléculas, de manera que se forman moléculas de menor tamaño.

La pirólisis de las grasas, con ayuda de óxido de silicio o de aluminio como catalizador, es una manera de obtener combustibles químicamente similares al diésel de petróleo. Sin embargo, es un proceso caro. Además, al remover el oxígeno del proceso se pierden los beneficios ambientales de ser un combustible oxigenado (como la mejor combustión y menores emisiones contaminantes). Este combustible obtenido del craqueamiento térmico de las grasas no es biodiésel (no está compuesto por ésteres de ácidos grasos), pero es también un combustible renovable semejante al diésel de petróleo (Ribeiro, 2004).

5.4 TECNOLOGÍAS BIOMASA A LÍQUIDO

Estas tecnologías implican la síntesis de combustibles líquidos a partir de biomasa sólida mediante un proceso termoquímico³⁷. Su objetivo es producir combustibles similares a la gasolina y el diésel, que puedan ser utilizados con los sistemas de distribución y los motores actuales. Son procesos denominados de *segunda generación*, pues su aplicación a la biomasa se encuentra actualmente en fase de investigación y demostración. Hasta el momento han sido aplicados a gran escala utilizando materias primas fósiles (carbón o gas natural).

Su ventaja es que permitirían obtener combustibles a partir de casi cualquier tipo de biomasa con bajo contenido de humedad, tal como residuos orgánicos, grasas perennes, paja, clareo de bosques, residuos de la producción de papel, bagazo, madera de desecho, papel de desecho, cultivos lignocelulósicos, etc. (Biofuels Technology Platform, 2007). Es decir, con estas tecnologías no se necesitará partir de un aceite para obtener combustibles, sino de cualquier materia prima orgánica.

³⁷ Cabe mencionar que estas tecnologías son diferentes a la producción de biodiésel, tanto en sus materias primas, como en el tipo de proceso y productos. Sin embargo, debido a su importancia potencial en la producción de biocombustibles líquidos, estamos incluyendo una breve descripción en esta parte.

La primera etapa del proceso consiste en la gasificación de la biomasa. El gas producido es luego tratado para purificarlo mediante la remoción de material particulado y contaminantes gaseosos, y para ajustar los porcentajes de los gases obtenidos (hidrógeno y monóxido de carbono) a los requerimientos del proceso. Este gas de síntesis puede ser utilizado en una segunda etapa catalítica para obtener combustibles líquidos. Existen dos procesos catalíticos en uso hasta el momento: El proceso Fischer-Tropsch y el proceso Mobil (Biofuels Technology Platform, 2007).

En el proceso Fischer Tropsch, el monóxido de carbono y el hidrógeno se convierten en hidrocarburos líquidos de varias longitudes y formas, utilizando catalizadores basados en el hierro y el cobalto y luego utilizando procesos de craqueamiento e isomerización para obtener el combustible deseado. Esta tecnología se aplica actualmente a gran escala al carbón y el gas natural. Una de sus desventajas es el alto costo de inversión y operación que podría elevarse aún más para el caso de la biomasa, debido a la necesidad de transportar materia prima desde lugares lejanos, lo cual implicaría mayores costos de operación (transporte) o menores economías de escala (plantas más pequeñas para procesar sólo materia prima local). Su ventaja es que el combustible obtenido es de excelente calidad: no contiene azufre o sustancias aromáticas, su número de cetano es muy alto, y su combustión resulta en muy bajas emisiones particuladas (Biofuels Technology Platform, 2007; Innovation, Energie, Environnement, 2007).

La segunda opción es el proceso Mobil, en el que se produce metanol primero a partir del gas. El metanol es luego utilizado como materia prima para obtener hidrocarburos de diversa longitud, utilizando zeolitas como catalizadores. Este proceso es utilizado actualmente en Nueva Zelanda para elaborar combustibles a partir de metanol obtenido del gas natural (Biofuels Technology Platform, 2007).

Se estima que con estas tecnologías se pueden producir más de 4m³ de combustible por hectárea de terreno dedicado a cultivos energéticos por año en Europa.

5.5 COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS DISCUTIDOS

En la Tabla 5.3 se presenta, a modo de resumen para esta parte, una comparación de los requerimientos técnicos, ventajas y desventajas de cada uno de los métodos discutidos. La transesterificación alcalina, a pesar de sus limitaciones, es la única utilizada comercialmente hasta el momento. Mayor desarrollo de las otras tecnologías es necesario para confirmar su viabilidad técnica y económica a gran escala, pero su potencial es interesante.

Tabla 5.3: Características de principales los procesos para la producción de biodiésel

Método	Transesterificación alcalina	Esterificación y transesterificación alcalina	Transesterificación alcalina con etanol	Transesterificación enzimática	Transesterificación con catalizador heterogéneo	Transesterificación supercrítica	Transesterificación supercrítica con co-solvente
Alcohol	Metanol	Metanol	Etanol	Metanol	Metanol	Metanol	Metanol
Catalizador	NaOH, KOH ó metilato de sodio	H ₂ SO ₄ y NaOH, KOH ó metilato de sodio	NaOH, KOH ó metilato de sodio	Lipasas	Óxido de zinc y aluminio	-	-
Razón molar alcohol: aceite	6:1	30-50:1 (esterif.) 6:1 (transesterif.)	9:1 - 12:1	4:01	n/d	42:1	24:1
Temperatura (°C)	50-80	50-80	30-70	30-40	n/d	320	280
Presión (bar)	1	1	1	1	n/d	400	128
Tiempo de reacción (min)	60-120	60+60	60	720	n/d	5-15	5-15
Sensibilidad a presencia de agua	Sí	Sí	Alta	No	n/d	No	No
Sensibilidad a ácidos grasos libres	Sí	No	Sí	No	n/d	No	No
Pretratamiento requerido	Neutralización aceite	Esterificación ácida es pretratamiento	Neutralización y secado de aceite	No	No	No	No
Remoción de catalizador	Neutralización y lavado con agua	Neutralización y lavado con agua	Neutralización y lavado con agua	Filtrado	Filtrado	No necesaria	No necesaria
Remoción de jabones	Lavado con agua	Lavado con agua	Lavado con agua	No necesaria	No necesaria	No necesaria	No necesaria
Rendimiento en biodiésel	96%	97%	95%	95%	98%		98%
Calidad de glicerol	Baja	Baja	Baja	Alta	Alta (98% de pureza)	Alta (96,4% de pureza)	Alta (96,4% de pureza)
Efluentes	Alcalinos-jabonosos	Ácidos y alcalinos-jabonosos	Alcalinos-jabonosos	No hay	No hay	Agua de refrigeración	Agua de refrigeración
Otros	Limitado a aceites de buena calidad. Rendimiento se puede mejorar realizándolo en 2 etapas.	Se requiere equipos resistentes a ácido sulfúrico (caros).	Limitado a aceites de muy buena calidad y etanol anhidro.	Se necesitan cosolventes. Enzimas son caras. Separación por centrifugación.	Proceso en dos etapas	Altos costos de inversión y operación, compensados por menor pre- y post-tratamiento	Requiere cosolvente: propano. Altos costos compensados por menor pre- y post-tratamiento.

USOS DEL BIODIÉSEL

6.1 INTRODUCCIÓN

Como vimos en la primera parte de este libro, el biodiésel es un biocombustible derivado de aceites o grasas animales o vegetales, que puede ser utilizado como *sustituto* o como *aditivo* del diésel de petróleo convencional. Tanto la finalidad como las consideraciones técnicas para su uso serán algo diferentes en cada caso, aunque lo sustancial es que el biodiésel no requiere mayores modificaciones tecnológicas tanto para su distribución, comercialización o uso en motores tipo diésel.

En los siguientes párrafos describiremos las consideraciones necesarias para el empleo adecuado de este biocombustible en estas dos formas (sustituto o aditivo del diésel), en base a las normas técnicas y estándares que garantizan su calidad.

6.2 CONTROL DE CALIDAD DEL BIODIÉSEL

La calidad del biodiésel es generalmente controlada en base a ciertos parámetros físicos y químicos establecidos por normas técnicas aprobadas en cada país. Las principales normas técnicas para el biodiésel son la europea (EN 14214) y la estadounidense (ASTM D6751-07). Es importante recalcar que aunque es necesario garantizar una adecuada calidad para que los usuarios se animen a consumir el producto, los estándares de calidad deben estar de acuerdo con la realidad nacional. Copiar estándares extranjeros puede constituir una barrera, ya que en muchos casos estos estándares son diseñados con el objetivo de controlar el mercado en lugar de facilitar su implementación (Matthews y O'Connor, 2006).

Por ejemplo, la norma ASTM está orientada principalmente a la producción de biodiésel a partir de aceite de soya, producto abundante en los Estados Unidos pero con muy limitada producción en el Perú. El biodiésel de ricino o higuera, por ejemplo, con interesante potencial para su producción en la costa peruana, no cumpliría con el parámetro de viscosidad de esta norma.

En caso de utilizar la norma técnica europea (EN 14214) se podrían tener problemas con el biodiésel a producirse con aceite de soya importado, el cual no cumpliría con los contenidos de fósforo y/o índice de yodo normados; y con el biodiésel producido a partir de aceite de pescado, cuyo alto grado de insaturación implicaría elevados índices de yodo.

En la Tabla 6.1 se presenta una comparación entre la norma técnica estadounidense (ASTM D6751-07) y la europea (EN 14214), así como la norma peruana para diésel 2 (NTP 321.003 2005 y D.S. 041-2005). La Tabla 6.2 muestra el significado de cada uno de los parámetros incluidos en las normas, tanto en relación con la performance del combustible en el motor, como en relación con la calidad de la producción del biodiésel.

6.3 Uso DEL BIODIÉSEL PURO

El biodiésel puro (B100, como se conoce en la nomenclatura técnica asumida por varios países, donde B representa al biodiésel y 100 representa al porcentaje de mezcla con diésel – en este caso 100 porque la «mezcla» es 100% de biodiésel y 0% de diésel) tiene propiedades físicas y químicas similares a las del diésel de petróleo, y por lo tanto puede ser utilizado con los mismos equipos y motores que el diésel con poca o ninguna modificación.

El cumplimiento de las normas técnicas de calidad es suficiente para garantizar que su uso no va a causar problemas de performance en el motor. Sin embargo, algunas propiedades específicas del B100 deben ser tomadas en cuenta durante su manipulación y uso (DOE, 2006a):

Propiedades solventes del biodiésel

El biodiésel es un buen solvente. Si es incorporado en un sistema que anteriormente era alimentado con diésel, y aún más con un diésel con alta cantidad de impurezas como el que se tiene en Perú, el biodiésel puede con el tiempo soltar y disolver sedimentos dejados por el combustible anterior en los tanques y sistemas de combustible. Al remover estos sedimentos, ellos entrarán en el flujo de combustible, pudiendo ocasionar taponeo de filtros y/u obstrucción de los conductos de combustible.

Es muy recomendable, entonces, limpiar el sistema de almacenamiento y conducción del combustible antes de cambiar a biodiésel, y revisar los filtros de los vehículos y el interior del sistema de distribución antes de usar por primera vez el biodiésel y cambiarlos antes y después del primer uso de biodiésel en caso de ser necesario. Asimismo, hay que tener cuidado con las superficies pintadas, ya que el biodiésel puede disolver ciertos tipos de pinturas.

Tabla 6.1: Normas técnicas de calidad para biodiésel y diésel

Parámetro	Unidad de medida	Norma Estadounidense Biodiésel (ASTM D6751-07)	Norma Europea Biodiésel (EN 14214)	Norma Peruana Diésel 2 (NTP 321.003 2005 y D.S. 041-2005) ³⁸
VOLATILIDAD				
Punto de inflamación	°C	130 mín.	120 mín.	55 mín. (52 mín.)
Temperatura de destilación, 90% de recuperación	°C	360 máx.		(282 – 360)
Temperatura de destilación, 95% de recuperación	°C			360 máx. (no indica)
Destilado recuperado a 250°C	% vol			65 máx. (no indica)
Destilado recuperado a 350°C	g/cm ³			80 mín. (no indica)
Densidad a 15°C			0,86 – 0,90	0,82 – 0,845 (reportar)
FLUIDEZ				
Viscosidad cinemática a 40°C	mm ² /s	1,9 – 6,0	3,5 – 5,0	2,0 – 4,5 (1,7 – 4,1 para el diésel y 1,9 – 4,1 para el diésel especial) (4 máx.)
Punto de escurrimiento	°C			
Punto de niebla	°C	Reportar al consumidor		
Punto de taponamiento de filtros	°C		Específico para cada país	
CONTAMINANTES				
Agua y sedimentos	% vol.	0,05 máx.	0,05 máx.	0,05 máx. (0,05 máx.)
Material particulado	mg/L			24 máx. (no indica)
Contaminación total	% peso		0,0024 máx.	

³⁸ El Decreto Supremo 041-2005 aprobó unas nuevas especificaciones para el Diésel 2 a ser utilizado en el Perú, en reemplazo de las especificaciones indicadas en la NTP 321.003. El mismo Decreto Supremo establece que la NTP será de aplicación recién a partir del 2010, para dar tiempo a los productores a adaptarse a sus requerimientos más estrictos. En el cuadro, los cambios introducidos por el DS 041-2005 se encuentran entre paréntesis y en cursiva.

Parámetro	Unidad de medida	Norma Estadounidense Biodiésel (ASTM D6751-07)	Norma Europea Biodiésel (EN 14214)	Norma Peruana Diésel 2 (NTP 321.003 2005 y D.S. 041-2005) ³⁸
Azufre total	% peso	0,0015 máx. (S15), 0,05 máx. (S500)*	0,001 máx.	0,035 máx. (S350), 0,005 máx. (S50) (0,5 máx. para el Diésel 2 y 0,05 máx. para el Diésel 2 Especial)
CORROSIVIDAD Y ESTABILIDAD				
Corrosión de lámina de cobre	Horas	No. 3 máx.	No. 1 máx	No. 1 máx. (No. 3 máx.)
Estabilidad a la oxidación a 110°C	mg/100 ml	3 mín.	6 mín.	
Estabilidad a la oxidación	mm			25 máx. (no indica)
Lubricidad, diámetro rasgado de uso corregido, HFRR a 60°C				0,46 máx. (no indica)
COMPOSICIÓN				
Número de cetano		47 mín.	51 mín.	51 mín. (45 mín. para Diésel 2 y 50 mín. para Diésel 2 Especial)
Índice de cetano				46 mín. (40 mín. para Diésel 2 y 45 mín. para Diésel 2 Especial)
Ceniza sulfatada	% peso	0,02 máx.	0,02 máx.	0,01 máx. (0,01 máx.)
Cenizas	% peso			0,3 máx. (0,35 máx.)***
Residuo de carbón	% peso	0,05 máx.**		
Residuo de carbón del 10% del destilado	% peso		0,3 máx.	
Índice de acidez	mg KOH/g	0,50 máx.	0,50 máx.	0,08 máx. (no indica)
Índice de yodo			120 máx.	
Glicerina libre	% peso	0,02 máx.	0,02 máx.	

Parámetro	Unidad de medida	Norma Estadounidense Biodiésel (ASTM D6751-07)	Norma Europea Biodiésel (EN 14214)	Norma Peruana Diésel 2 (NTP 321.003 2005 y D.S. 041-2005) ³⁸
Glicerina total	% peso		0,25 máx.	
Metanol	% peso		0,20 máx.	
Contenido de éster	% peso		96,5 mín.	
Monoglicéridos	% peso		0,8 máx.	
Diglicéridos	% peso		0,2 máx.	
Triglicéridos	% peso		0,2 máx.	
Metil-éster de ácido linoléico	% peso		12 máx.	
Ésteres insaturados C4 y mayores	% peso		1 máx.	
Contenido de fósforo	% peso	0,24 máx.	0,001 máx.	
Metales del grupo I (Na, K)	% peso	0,001 máx.	0,0005 máx.	
Metales del grupo II (Ca, Mg)	% peso	0,0005 máx.	0,0005 máx.	
Contenido de aromáticos	% vol.	0,0005 máx.		35 máx. (no indica)
Contenido de ésteres metílicos de ácidos grasos	% vol.			5 máx. (no indica)

Tabla 6.2: Explicación de los parámetros de calidad en las normas técnicas para biodiésel

Parámetro	Importancia para performance en el moto	Relación con calidad del biodiésel y su producción
VOLATILIDAD		
Punto de inflamación	Mide la tendencia de un combustible de formar mezclas inflamables con el aire. Se usa para evaluar el riesgo de inflamación de un material. Se establece un mínimo para seguridad contra incendios. En el biodiésel este límite se utiliza para garantizar que se haya removido todo el metanol. El exceso de metanol además puede afectar a las bombas de combustible, sellos y empaquetaduras, y resultar en mala combustión.	Se requiere evaporar el exceso de metanol luego de la transesterificación.
Temperatura de destilación, 90% de recuperación	El diésel tiene una curva de destilación, determinada por los diferentes hidrocarburos que lo contienen. Por eso se establecen porcentajes de destilado recuperado a diferentes temperaturas. El biodiésel tiene prácticamente un punto de destilación, que se ubica en el rango más alto de la curva del diésel. Este parámetro se incorpora para controlar que el combustible no haya sido contaminado con materiales de mayor punto de evaporación.	Determinado por las características del aceite utilizado para producir el biodiésel.
Temperatura de destilación, 95% de recuperación		
Destilado recuperado a 250°C		
Destilado recuperado a 350°C		
FLUIDEZ		
Viscosidad cinemática a 40°C	La viscosidad es una medida de la resistencia del combustible a fluir. Cuando la temperatura aumenta, la viscosidad disminuye. Algunos motores requieren una viscosidad mínima para evitar pérdidas durante la inyección del combustible (lo cual no es problema con el biodiésel, que suele tener mayor viscosidad que el diésel). La viscosidad máxima depende del diseño del sistema de inyección. Un combustible muy viscoso puede causar una mala atomización, que lleva a mala combustión y formación de depósitos. La alta viscosidad también puede facilitar la contaminación del combustible con el aceite lubricante.	La viscosidad del biodiésel viene determinada por el aceite de origen, y por su contenido en mono-, di- y triglicéridos. Una transesterificación completa es necesaria para asegurar el cumplimiento de este parámetro.

Parámetro	Importancia para performance en el moto	Relación con calidad del biodiésel y su producción
Punto de escurrimiento Punto de niebla Punto de taponamiento de filtros	Miden la performance del combustible a bajas temperaturas. El biodiésel suele tener puntos de escurrimiento, niebla y taponamiento de filtros mayores que los del diésel.	Determinados por las características del aceite utilizado. Etiquetado importante para que los consumidores conozcan en qué situaciones no usar el combustible. Uso de anticongelantes u otras medidas de mejora puede ser necesario en climas fríos.
CONTAMINANTES		
Agua y sedimentos	Se refiere al contenido de gotas de agua y partículas que sedimentan en el combustible. El agua puede generar corrosión y promueve el desarrollo de microorganismos. Los sedimentos pueden causar problemas de taponamiento de filtros e inyectores.	Técnicas inadecuadas de secado del biodiésel o contacto con agua durante el transporte pueden afectar este parámetro. El biodiésel es muy higroscópico y puede absorber agua si es almacenado en contacto con el aire húmedo, o durante las operaciones de carga y descarga. Es recomendable almacenarlo bajo una atmósfera inerte (nitrógeno) o tener tanques con techo flotante. Los sedimentos pueden aparecer debido a la oxidación del combustible, así que este análisis, junto con los de acidez y viscosidad ayudan a establecer si el combustible se ha oxidado durante su almacenamiento.
Material particulado	Indica el potencial de emisión de material particulado.	Un adecuado lavado y filtrado del biodiésel debe poder limitar su presencia.
Azufre total	El azufre se controla para evitar las emisiones de óxidos de azufre a la atmósfera y para minimizar la corrosión y desgaste.	El biodiésel por lo general contiene menos de 15 ppm de azufre.
CORROSIVIDAD Y ESTABILIDAD		
Corrosión de lámina de cobre	Esta prueba indica problemas potenciales con la presencia de partes de cobre o bronce en el sistema de combustible. Si el combustible contiene ácidos o compuestos de azufre puede causar corrosión en el cobre o bronce.	CORROSIVIDAD Y ESTABILIDAD El biodiésel que cumple con las demás especificaciones cumple también con este parámetro. Cabe mencionar que aunque el biodiésel no cause corrosión del cobre o bronce, el contacto prolongado con estos metales si puede causar la degradación del combustible y la formación de depósitos.

Parámetro	Importancia para performance en el moto	Relación con calidad del biodiésel y su producción
<p>Estabilidad a la oxidación a 110°C</p> <p>Estabilidad a la oxidación</p>	<p>Aún no hay consenso sobre la mejor manera de medir la estabilidad oxidativa del biodiésel, pero este parámetro es importante en dos contextos:</p> <ul style="list-style-type: none"> -para asegurar que el combustible puede ser almacenado durante largo tiempo sin riesgo para su calidad -estabilidad durante la circulación del biodiésel en el sistema de combustible del motor, bajo altas temperaturas y presiones. <p>Un biodiésel oxidado tendrá alta acidez y viscosidad, y generará gomas y sedimentos que pueden taponar filtros y afectar todo el sistema de combustible y de inyección.</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Depende principalmente del aceite que da origen al biodiésel: A mayor nivel de insaturación, menor estabilidad a la oxidación. -El calor y la luz solar aceleran la oxidación. -Algunos metales aceleran la oxidación (cobre, bronce, latón, plomo, estaño y zinc). -El contacto con el aire acelera la oxidación. -Los procesos de blanqueado, desodorización o destilación del aceite vegetal o biodiésel puede eliminar los antioxidantes naturales que ayudan a retrasar este proceso. -También se pueden añadir antioxidantes artificiales. Algunos estudios indican que el biodiésel menos estable podría ser almacenado hasta por 8 meses sin causar problemas.
COMPOSICIÓN		
Número de cetano	Mide la calidad de ignición de un combustible diésel: un alto número de cetano indica un menor retraso en la ignición, ayuda a un mejor arranque del motor y minimiza la emisión de humo.	El biodiésel tiene por su propia naturaleza un número de cetano mayor al del diésel. Depende del nivel de saturación del aceite de origen:
Índice de cetano	Indicador del número de cetano basado en un cálculo a partir de la gravedad específica y la curva de destilación del combustible. No es adecuado para estimar el número de cetano en el biodiésel o sus mezclas.	<ul style="list-style-type: none"> -Aceites o grasas altamente saturados tendrán un número de cetano muy alto (70 o más). -Aceites poliinsaturados (como soya, girasol, maíz y colza) tendrán un menor número de cetano, de alrededor de 47. -Aceites de mayor longitud de cadena tendrán un cetano mayor.

Parámetro	Importancia para performance en el moto	Relación con calidad del biodiésel y su producción
Ceniza sulfatada	Los compuestos que forman cenizas pueden contribuir a formar depósitos en los inyectores o en todo el sistema de combustible, y/o a causar desgaste en los inyectores, bomba de combustible, pistones y anillos.	Depende principalmente de la cantidad de catalizador residual presente en el biodiésel, o de cualquier otro compuesto que produzca cenizas (jabones y sólidos abrasivos). El lavado del biodiésel asegura el cumplimiento de este parámetro.
Cenizas		
Residuo de carbón	Indica la tendencia del combustible a producir depósitos carbonosos. Para el diésel convencional se mide en el 10% del residuo de destilación. Como el biodiésel se evapora aproximadamente a la misma temperatura, es difícil obtener este residuo de destilación, y por lo tanto el residuo de carbón se determina en toda la muestra.	La formación de depósitos carbonosos en el biodiésel puede deberse a: -Transesterificación incompleta (presencia de mono-, di- y triglicéridos) -Combustible oxidado durante su almacenamiento
Residuo de carbón del 10% del destilado		
Índice de acidez	Altos índices de acidez han sido asociados a depósitos en el sistema de combustible y a una menor vida útil de bombas y filtros de combustible.	Indica la presencia de ácidos grasos libres en el biodiésel, debido a: -Producción inadecuada. -Combustible degradado durante su almacenamiento.
Índice de yodo	A mayor índice de yodo, menor estabilidad oxidativa del biodiésel. A mayor insaturación de los ácidos grasos (mayor índice de yodo), mayor riesgo de contaminación y dilución del aceite lubricante con el biocombustible.	Depende del tipo de aceite usado. Su cumplimiento puede ser ajustado mediante la mezcla de diferentes aceites.
Glicerina libre	Un contenido alto de glicerina total y libre puede llevar a depósitos en el tanque de almacenamiento, sistema de combustible y motor. Además, causará taponeamiento de filtros y otros problemas de performance.	-La glicerina libre indica presencia de glicerol residual en el biodiésel, debido a deficiencia en su lavado o purificación. -La glicerina total indica presencia de glicerol residual y de mono-, di- y triglicéridos, debido a una transesterificación incompleta.
Glicerina total		
Metanol	El exceso de metanol incrementa los riesgos de incendio, puede afectar a las bombas de combustible, sellos y empaquetaduras, y resultar en mala combustión. La norma ASTM utiliza el punto de inflamación para controlar este parámetro.	Se requiere evaporar el exceso de metanol luego de la transesterificación.

Parámetro	Importancia para performance en el motor	Relación con calidad del biodiésel y su producción
Contenido de éster	Mide la pureza del biodiésel.	Depende de una transesterificación completa y un lavado y purificación suficientes.
Monoglicéridos	Su presencia puede llevar a depósitos en el tanque de almacenamiento, sistema de combustible y motor. Además, causará taponeamiento de filtros y otros problemas de performance.	Su presencia muestra una reacción incompleta. Ajustar cantidad de metanol y catalizador utilizados, y/o incrementar temperatura, tiempo y agitación durante la reacción.
Diglicéridos		
Triglicéridos		
Metil-éster de ácido linoléico	Parámetro incorporado en la norma europea para limitar la presencia de ácidos grasos poliinsaturados en el biodiésel, los cuales favorecen la dilución del aceite lubricante.	Su presencia depende del aceite vegetal de origen.
Contenido de fósforo		
	El fósforo puede dañar los convertidores catalíticos de los autos.	Algunos aceites vegetales contienen cantidades significativas de fósforo.
Metales del grupo I (Na, K)	Parámetros incorporados en la norma europea y americana para controlar la pureza del biodiésel. Estos metales pueden estar presentes como sólidos abrasivos o como jabones solubles. Los sólidos pueden causar el desgaste de partes del motor, y tanto ellos como los jabones pueden contribuir al taponeamiento de filtros y la formación de depósitos en el motor.	Un buen proceso de lavado del biodiésel debe asegurar una pureza suficiente para cumplir con estos parámetros.
Metales del grupo II (Ca, Mg)		
Contenido de aromáticos		
Contenido de ésteres metílicos de ácidos grasos	Parámetro incorporado en la NTP peruana para limitar la adición de biodiésel en el diésel a un 5% máximo. No incluido en el D.S.041-2005.	

Fuentes: Norma ASTM D 6751-07; DOE, 2006a; Matthys, 2003; Demirbas, 2006; Srivastava y Prasad, 2000; Prankl, 2000.

Propiedades de flujo en frío

El biodiésel se congela a temperaturas más altas que el diésel convencional. Todas las propiedades de flujo en frío del combustible (punto de taponamiento de los filtros, punto de niebla, punto de escurrimiento³⁹) son superiores a las del diésel, lo que significa que a bajas temperaturas los motores con biodiésel pueden tener dificultades para arrancar, ya que el biodiésel se espesa y forma cristales sólidos, básicamente de grasas saturadas, que pueden bloquear los conductos de combustible. Igualmente, a temperaturas relativamente bajas, la viscosidad del combustible también empieza a incrementar, pudiendo causar estrés en las bombas de combustible y el sistema de inyección.

Estas propiedades de flujo a bajas temperaturas dependen de la materia prima con la que se fabricó el biodiésel. Así, si la materia prima es un aceite como el de girasol o de colza, su punto de fusión será menor que si fuera de manteca, o de aceite de palma (grasas sólidas a temperatura ambiente). En el Perú, este problema sería crítico para vehículos que circulen en la Sierra o que la crucen utilizando biodiésel puro (B100), pues esta es la única zona del territorio nacional donde las temperaturas pueden bajar por debajo de los 0°C.

Algunas alternativas para operar con biodiésel en ambientes fríos son las siguientes:

- ▶ Separar biodiésel de verano y biodiésel de invierno, mediante métodos de fraccionamiento o winterización.
- ▶ Etiquetar adecuadamente las temperaturas mínimas recomendadas para el combustible en las estaciones de servicio.
- ▶ Mezclar el combustible con diésel N°1 (kerosene).
- ▶ Utilizar calentadores de combustible.
- ▶ Emplear aditivos (anticongelantes).
- ▶ Guardar el vehículo en el interior de una cochera.

Compatibilidad con ciertos materiales

El biodiésel puro no es compatible con algunos materiales utilizados normalmente en mangueras y empaquetaduras. El B100 puede ablandar y degradar algunos tipos de jebe (Buna N, nitrilo, caucho natural), haciendo que goteen o incluso se vayan desintegrando con el tiempo. Esto puede causar derrames de combustible, problemas en la bomba de combustible, u obstrucción del filtro con partículas del material de las mangueras. Si se utiliza biodiésel puro, o en mezclas mayores al 20%, se debe comprobar que los materiales de todas las mangueras y empaquetaduras del sistema de combustible son compatibles con este bio-combustible. Muchas marcas de vehículos ya vienen de fábrica con mangueras resistentes al biodiésel, pero no todas, ya que estos materiales son ligeramente más caros.

³⁹ Punto de niebla (cloud point): la temperatura a la cual se empiezan a formar cristales en el combustible.

Punto de escurrimiento (pour point): la menor temperatura a la cual el combustible aún fluye (se derrame) de un contenedor. Corresponde a la menor temperatura a la cual el combustible puede ser bombeado.

Punto de taponamiento de filtros en frío (cold filter plugging point – CFPP): es la menor temperatura a la cual un determinado volumen de combustible puede ser pasado a través de un filtro (tamiz) metálico. Usualmente corresponde a la menor temperatura a la cual el motor puede operar con ese combustible.

Fuente: Iowa State University, 2004.

Igualmente, el biodiésel puro no es compatible con algunos metales y plásticos. Si está en contacto durante periodos prolongados con cobre, aleaciones de cobre, plomo, estaño o zinc, puede empezar a degradarse y formar sedimentos sólidos, los cuales podrían causar obstrucción de los filtros de combustible. Asimismo, el biodiésel puede atravesar algunos plásticos comunes (polietileno, polipropileno) si está en contacto prolongado con ellos, y por eso estos materiales no deben ser utilizados para almacenar biodiésel.

Contenido energético

El contenido energético del biodiésel es ligeramente menor que el del diésel (12% en peso u 8% en volumen), y por lo tanto su uso implicará un consumo ligeramente mayor, así como ciertas pérdidas en potencia y torque.

Estabilidad y durabilidad del biodiésel

En lo referente al tiempo de duración, los expertos recomiendan que el biodiésel se debe consumir dentro del año de producción para asegurar el mantenimiento de las cualidades del combustible. Las condiciones de almacenamiento deben ser adecuadas: sin exposición a la luz, sin contacto con el aire (es decir, en envases llenos y cerrados), sin contacto con la humedad y de ser posible a temperaturas no superiores a los 20°C. De preferencia, sin embargo, el biodiésel no se debe almacenar por largos períodos de tiempo, y por lo tanto los niveles de producción deben ser establecidos en función a la demanda.

En contraste, como ya vimos en la primera parte de este libro, otras propiedades específicas del biodiésel son consideradas ventajas en el aspecto técnico, entre las cuales se puede resaltar:

- ▶El biodiésel tiene significativamente menos azufre que el diésel de petróleo, pero mantiene una alta lubricidad.
- ▶El biodiésel contiene aproximadamente 11% de oxígeno en peso, y un número de cetano ligeramente mayor que el diésel convencional, lo cual implica una mejor combustión y una reducción en la mayoría de emisiones.

6.4 Uso DEL BIODIÉSEL EN MEZCLAS

La forma más común de utilizar el biodiésel es en mezclas – en diferentes porcentajes – con el diésel de petróleo, es decir, en forma de aditivo. Este enfoque tiene las siguientes ventajas:

- ▶Se reducen los problemas de uso en climas fríos.
- ▶Se evitan los problemas de incompatibilidad del biodiésel con el caucho y otros plásticos de mangueras y empaquetaduras.

- ▶ Se reduce el efecto de solvente.
- ▶ Se mejoran las emisiones (aunque en menor porcentaje que si se usa biodiésel puro), sin reducir significativamente la potencia y torque.

Diferentes países fomentan determinados porcentajes de mezcla, según los objetivos que quieran alcanzar.

- ▶ Si se desea promover el empleo en el sector agropecuario mediante la producción de aceites vegetales para biodiésel, se debe tener en cuenta la capacidad de producción local de oleaginosas. Este es el enfoque de Brasil – que establece mezclas del 2% en un inicio y luego del 5% - y de la Comunidad Europea – con diferentes enfoques de mezcla según países.
- ▶ Si el objetivo es mejorar la calidad del aire en las ciudades, se requiere mezclas de al menos 20% ó 30% de biodiésel.
- ▶ Con mezclas mayores al 20-30% se logran mayores beneficios de reducción de emisiones de CO, material particulado e hidrocarburos, pero las emisiones de NOx pueden subir (dependiendo del tipo de motor). De importancia especial es la reducción en las emisiones de hidrocarburos policíclicos aromáticos y otros compuestos carcinogénicos o tóxicos que se encuentran normalmente en los escapes del diésel. Sin embargo, con estos niveles de mezcla se debe tener cuidado con el uso del combustible en climas fríos (por debajo de 0°C), con el efecto de disolución y limpieza del biodiésel, y con compatibilidad con los materiales de las mangueras y empaquetadoras (DOE, 2006a).

6.4.1 CÓMO REALIZAR LAS MEZCLAS

Para realizar las mezclas de biodiésel y diésel se debe tener en cuenta varios factores, como el porcentaje de mezcla, el volumen de biodiésel requerido para la mezcla, el volumen de mezcla final que se venderá o consumirá, la disponibilidad de tanques y espacio de almacenamiento, los costos de equipamiento y operación, y los requerimientos específicos para la mezcla (por ejemplo, temperatura mínima de uso).

La naturaleza química del biodiésel permite mezclarlo con cualquier tipo de diésel, incluyendo combustible de aviones, kerosene, diésel No. 1, combustibles para usos militares, diésel No. 2, y combustible para calderas o calefacción domiciliaria. Una vez que el biodiésel está completamente mezclado con el otro combustible, ambos componentes se quedan juntos en una fase, sin separarse en el transcurso del tiempo. Las mezclas con un contenido de 20% de biodiésel o menos deben ser manipuladas exactamente como si se tratara de diésel convencional.

En general, al mezclar biodiésel con diésel se debe tener en cuenta que:

- ▶ A mayor mezclado, mejor.
- ▶ El biodiésel es ligeramente más pesado que el diésel, por lo que si se incorpora primero

el biodiésel y luego el diésel en un tanque, la mezcla no será completa, ya que el biodiésel tenderá a quedarse en el fondo del recipiente. Luego, cuando el combustible es bombeado fuera del tanque, como las bombas generalmente cargan la parte del fondo, se tendrá un combustible con alta concentración de biodiésel, lo cual podría generar problemas en los meses fríos de invierno (congelamiento, gelificación en el fondo de los tanques, taponeo de filtros, etc).

Existen tres formas comunes de realizar las mezclas (DOE, 2006a):

►**Splash-blending**: El biodiésel es incorporado en un recipiente, tanque o vehículo de carga que ya contiene diésel. Al tener una mayor densidad, el biodiésel tiende a caer a través del diésel y mezclarse con éste. Se debe intentar, además, que el biodiésel sea incorporado de una manera dispersa sobre toda la superficie del diésel, por ejemplo en forma de lluvia. La agitación posterior durante el transporte del recipiente o tanque es usualmente suficiente para que ambos componentes se mezclen totalmente. Puede haber dificultades en la mezcla si es que el biodiésel es incorporado al recipiente antes que el diésel, y si las condiciones climáticas son de muy baja temperatura. Este tipo de mezcla es la que suele realizar un usuario final del combustible, que adquiere tanto el diésel como el biodiésel puros para realizar sus propias mezclas. Si el tanque o vehículo de transporte de combustibles se carga por su parte inferior, se necesita cargar primero el biodiésel y luego el diésel, el cual ascenderá a través del biodiésel gracias a su menor densidad, garantizándose una mezcla completa.

►**Mezcla en el tanque (*In-tank blending*)**: Similar a la operación anterior, es cuando el biodiésel y el diésel son cargados en un tanque, separadamente o al mismo tiempo pero por diferentes ingresos. La velocidad de llenado debe ser suficientemente alta como para que los combustibles se mezclen sin necesidad de recirculación o agitación adicionales. Si este no es el caso, se requiere recirculación o agitación para homogenizar la mezcla.

►**Mezcla en línea (*In-line blending*)**: Es cuando el biodiésel es añadido a un flujo de diésel que viaja por un ducto, tubería o manguera, de manera que ambos combustibles se mezclan completamente gracias al movimiento turbulento a lo largo del ducto. El biodiésel proviene de un ducto más pequeño conectado en Y con el ducto principal del diésel. Una mezcla homogénea es adicionalmente garantizada gracias a la agitación que ocurre cuando esta tubería finalmente descarga en un tanque o depósito.

6.4.2 ASPECTOS TÉCNICOS DEL USO DE BIODIÉSEL EN MEZCLAS

Las mezclas de biodiésel al 20% o menos (B20 o menos) minimizan la mayoría de problemas asociados con la compatibilidad de materiales: no hay riesgo con ningún tipo de plásticos y elastómeros presentes en mangueras y empaquetaduras normales. El B20 se degrada más rápido que el diésel de petróleo en contacto con cobre, bronce, latón o zinc, pero mucho más lento que el biodiésel puro, y en general tiene una mayor vida – puede ser almacenado por mayor tiempo – que el biodiésel puro. La estabilidad del B20 depende, al igual que la del biodiésel, del aceite de procedencia. La mayoría de B20, sin embargo, deberían poderse almacenar sin riesgo hasta por 8 a 12 meses (DOE, 2006a).

El B20, al igual que el biodiésel puro, tiene un efecto de limpieza de los sedimentos que se encuentran en el sistema de combustible del vehículo, aunque en menor intensidad. De este modo, usar B20 podría causar algo de taponeamiento de filtros en las primeras semanas de uso, mientras se limpia el sistema, pero sin otros efectos negativos (DOE, 2006a).

Añadir biodiésel al diésel de petróleo, aún en muy pequeñas cantidades (desde un 0,25%), incrementa significativamente su lubricidad. Es por esto que algunas flotas – y algunos países – han adoptado el B2 como su combustible habitual, para evitar el uso de otros aditivos lubricantes. Esto es especialmente importante para el diésel bajo en azufre, el cual tiene aún menor lubricidad que el diésel convencional. El biodiésel, al no tener azufre pero sí mayor lubricidad, actúa como excelente aditivo en estos casos (DOE, 2006a).

6.5 LA GARANTÍA DE LOS VEHÍCULOS CUANDO SE UTILIZA BIODIÉSEL

Originalmente, los primeros usos del biodiésel fueron agropecuarios: en maquinaria agrícola y tractores. Por eso, las primeras garantías para su uso fueron dadas por marcas de tractores: Same, Steyr, John Deere, Massey-Ferguson, Lindner, Mercedes-Benz, etc. Con el desarrollo de mercados más amplios se incrementaron las garantías a otros vehículos tipo diésel como buses, taxis, vehículos acuáticos y vehículos privados. La última extensión en garantías ha sido dada para la nueva generación de sistemas modernos de inyección de combustible de alta presión, como los usados por Mercedes-Benz, Peugeot y Volkswagen (Friedrich, 2004).

En la Tabla 6.3 se puede ver un resumen de las garantías de vehículos diésel existentes para operación con biodiésel, actualizada al año 2002.

Tabla 6.3: Garantías existentes para operación de vehículos diésel con biodiésel

Marca	Tipo	Modelo
Audi	Vehículos personales	Todos los modelos TDI desde 1996
BMW	Vehículos personales	Modelo 525 tds 1997 y 3 + 5 desde 2001
Casa – IH	Tractores	Todos los modelos desde 1971
Claes	Combinados, tractores	Existen garantías
Faryman Diesel	Motores	Existen garantías
Fiatagri	Tractores	Para los nuevos modelos
Ford AG	Tractores	Para los nuevos modelos
Holder	Tractores	Existen garantías
Iseki	Tractores	Series 3000 y 5000
John Deere	Tractores	Garantías desde 1987
John Deere	Combinados	Garantías desde 1987
KHD	Tractores	Existen garantías
Kubota	Tractores	Series OC, Super Mini, O5, O3
Lamborghini	Tractores	Serie 1000
Mercedes Benz	Vehículos personales	Series C y E 220, C 200 y 220 CDI, etc.
Mercedes Benz	Camiones, buses	Series BR 300, 400, Unimog desde 1988, etc.
Nissan	Vehículos personales	Tipo Primera desde 2001
Same	Tractores	Desde 1990
Seat	Vehículos personales	Todas las series TDI desde 1996
Skoda	Vehículos personales	Todas las series TDI desde 1996
Steyr	Tractores	Desde 1988
Steyr	Botes	Series M 16 TCAM y M 14 TCAM
Valmet	Tractores	Desde 1991
Volkswagen	Vehículos personales	Todas las series TDI desde 1996, todas las series SDI nuevas (EURO-3)
Volvo	Vehículos personales	Series S80-D, S70-TDI y V70-TDI

Fuente: Körbitz, 2002.

REFERENCIAS

- ABDULLAH R. (2003). «Short-term and long-term projection of Malaysian palm oil production». *Oil palm industry economic journal* 3(1): 32-36.
- ADEME. (1997). Base de données Ademe, matériaux d'emballage. Rapport final, 1997.
- AGARWAL D., SINHAB S., AGARWAL A.K. (2006). «Experimental investigation of control of NOx emissions in biodiesel-fueled compression ignition engine». *Renewable Energy* 31: 2356-2369.
- AHN E., MITTELBAACH M., MARR R. (1995). «A low waste process for the production of biodiesel». *Separation Science and Technology* 30(7-9): 2021-33.
- ALI Y., HANNA M.A., CUPPETT S.L. (1995). Fuel properties of tallow and soybean oil esters. *Journal of the American Oil Chemists' Society* 72: 1557-1564.
- ANDERSEN A.J.C. (1962). Refinación de aceites y grasas comestibles. México: Compañía Editorial Continental. 335 pp.
- APPLEWHITE T.H. (1980). En: Kirk-Othmer, *Encyclopedia of Chemical Technology*. Tercera Edición. Nueva York: John-Wiley & Sons. Vol. 9; pp. 795-811.
- ARANGO G.H. (2002). *Metabolitos primarios de interés farmacognóstico*. Universidad de Antioquía. Medellín, Colombia.
- AUSTRIAN BIOFUELS INSTITUTE. (2000). *World-wide trends in production and marketing of biodiesel*. Presentado en el Seminario ALTENER «New markets for biodiesel in modern common rail diesel engines. Graz: Universidad Tecnológica de Graz.
- BAYOD A.A., SEBASTIÁN F., ZABALZA I., SALLÁN J., ARANDA J.A., SANZ J.F., ROYO J., GIMENO D. (n/d). *Guía de las energías renovables aplicadas a las PYMES*. Zaragoza: CEPYME Aragón y CIRCE. 111 pp.
- BAILEY A. (1951). Aceites y grasas industriales. Buenos Aires, Argentina: Editorial Reverte. 2da Edición.

BEER T., GRANT T., WILLIAMS D., WATSON H. (2002). *Final Report (EV45A/2/F3C) to the Australian Greenhouse Office on the Stage 2 Study of Life-cycle Emissions Analysis of Alternative Fuels for Heavy Vehicles*.

BENZA G. (2006). *Oportunidades de inversión – Sierra Exportadora*. Presentación en el Seminario Shock de Inversiones, Financiamiento de Proyectos de Desarrollo y Fondos del Sistema Privado de Pensiones. Superintendencia de Banca, Seguros y AFP, 30 octubre 2006. http://www.proviasnac.gob.pe/planificacion/Shock_inversiones_

BIOFUELS TECHNOLOGY PLATFORM. (2007). *Biomass to liquid (Btl) biofuel production in Europe*. En: <http://www.biofuelstp.eu/btl.html>

BOURNAY L., CASANAVE D., DELFORT B., HILLION G., CHODORGE J.A. (2005). «New heterogeneous process for biodiesel production: A way to improve the quality and the value of the crude glycerin produced by biodiesel plants». *Catalysis Today* 106: 190–192.

BOZBAS K. (2006). «Biodiesel as an alternative motor fuel: Production and policies in the European Union». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (en prensa).

BRACK A. (2007). *Amazonía sostenible y biocombustibles*. Artículo publicado en el diario El Comercio el 20/02/2007.

BRADSHAW G.B., MEULY W.C. (1942). *Process of making pure soaps*. U.S. Patent No. 2,271,619.

BROWN B. (2006). *Rising oil price has wider impact*. En: CNN Online: <http://edition.cnn.com/2006/BUSINESS/08/06/btn.oilprice/index.html>. (Publicado el 07/08/2006)

CALAIS P., CLARK A.R. (2000). *Waste vegetable oils as a diesel replacement fuel*. Perth, Australia: Murdoch University y Western Australian Renewable Fuels Association. <http://www.shortcircuit.com.au/warfa/paper/paper.htm>

CAO W., HAN H., ZHANG J. (2005). «Preparation of biodiesel from soybean oil using supercritical methanol and co-solvent». *Fuel* 84: 347–51.

CEPES. (2004). «Palma aceitera, posibilidad en la selva». *La Revista Agraria* N° 54 - Lima, mayo 2004. <http://www.cepes.org.pe/revista/r-agra54/tecn-01.htm>

COELLO J., CASTRO P. (2006) «La alternativa el biodiésel: Oportunidades y puntos por resolver para la producción y uso de biodiésel en el Perú». *Revista Perú económico, Volumen XXIX, N° 11*, noviembre 2006. Lima: Apoyo Publicaciones.

COELLO J., CASTILLO L., CASTRO P., CALLE J.L., SEVILLA S., ACOSTA F., SOLOGUREN G., CANTURIN A., VIDAL C. (2006). *Evaluación de opciones para la producción de biodiésel a pequeña escala en el Perú*. Ponencia en II Seminario Internacional en Biocombustibles y Combustibles Alternativos. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

COMISIÓN TÉCNICA DE BIOCOMBUSTIBLES. (2004). *Informe final: Promoción del mercado de biocombustibles*. Lima: CONAM. Mayo de 2004.

CUNZA H., DÍAZ, P. (2006). *Situación energética del Perú*. Ponencia en Seminario Internacional de Biocombustibles. Brasilia: Ministério de Minas e Energia de Brasil y OLADE.

COLMENAR SANTOS A., CASTRO GIL M.A. (n/d). *Biblioteca multimedia de las energías renovables*. Madrid: IDAE.

CONAM. (2001). Comunicación nacional del Perú a la Convención de Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Primera Comunicación. Lima: CONAM. 120 pp.

DALY A. (2003). *La industria oleaginosa peruana: situación actual y perspectivas*. Presentación en el Primer Encuentro Nacional de Palma Aceitera – 18/06/2003. Lima: ProAmazonía. Disponible en: http://www.minag.gob.pe/proama_expo.shtml

DEMIRBAS A. (2006). «Biodiesel production via non-catalytic SCF method and biodiesel fuel characteristics». *Energy Conversion and Management* 47: 2271–2282.

DOE. (2006a). *2006 Biodiesel handling and use guidelines*. Oak Ridge: U.S. Department of Energy – Office of Scientific and Technical Information. 61 pp.

DOE (2006b). *State and Federal Incentives and Laws*. U.S. Department of Energy: Alternative Fuels Data Center: http://www.eere.energy.gov/afdc/progs/view_ind_mtx.cgi?tech/BIOD/US/0 (Última actualización el 12/06/2006).

DORNELLES R. (2006). *Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel*. Presentación en la 1ra reunión del Grupo Técnico de Biodiésel – 18/05/2006.

DORSA R. (2004). *Vegetable oils technology*. Campinas, Brasil: Westfalia Separator do Brasil Ltda.

DUKE J.A. (1983). *Handbook of Energy Crops*. Disponible en: http://www.hort.purdue.edu/newcrop/duke_energy

EL COMERCIO. (2005). *Los agentes contaminantes*. Nota publicada en el diario el 03/07/2005.

EPA. (2002). *A Comprehensive Analysis of Biodiesel Impacts on Exhaust Emissions*. Draft Technical Report. EPA420-P-02-001. Assessment and Standards Division, Office of Transportation and Air Quality, U.S. Environmental Protection Agency.

FAO. (2007). *State of the World's Forests 2007*. Roma: FAO.

FENNEMA O.R. (1993). *Química de los alimentos*. Zaragoza: Editorial Acribia. 536 pp.

FERNÁNDEZ GONZÁLEZ J. (1998). «Cultivos energéticos – Una alternativa». *El campo y el medioambiente – Un futuro en armonía*. Madrid: Banco Central Hispano. 205-217.

FERNÁNDEZ GONZÁLEZ J. (1998). «La energía de la biomasa en relación con el efecto invernadero». *Energía y Cambio Climático*. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente.

FERNÁNDEZ GONZÁLEZ J. (2002). *Barreras para el desarrollo del empleo de los biocombustibles sólidos y líquidos*. Ponencia en las Jornadas sobre Aportación de la Biomasa al Desarrollo de las Energías Renovables. Madrid: IDAE. 12-13 diciembre 2002.

FINANZAS.COM (2005). *Las principales causas de la subida del precio del crudo en 2005*. En: <http://www.finanzas.com/id.8846900/noticias/noticia.htm> Publicado el 12/12/2005.

FOIDL N., EDER P. (1997). «Agro industrial exploitation of jatropha curcas». *Biofuels and industrial products for Jatropha curcas*. Ed.: G.M. Gübitz, M. Mittelbach y M. Trabi. Graz: Technische Universität Graz, Austria.

FOREST PEOPLES PROGRAMME. (2006). Press release: *Indonesian Palm Oil production blights the poor: major reforms needed, claim two new reports*. http://www.forestpeoples.org/documents/prv_sector/oil_palm/oil_palm_press_rel_indonesia_nov06_eng.shtml

FREEDMAN B., BUTTERFIELD R.O., PRYDE E.H. (1986). «Transesterification kinetics of soybean oil». *Journal of the American Oil Chemists' Society* 63(10): 1375–80.

FREEDMAN B., PRYDE E.H., MOUNTS T.L. (1984). «Variables affecting the yields of fatty esters from transesterified vegetable oils». *Journal of the American Oil Chemists' Society* 61: 1638– 1643.

FRIEDRICH S. (2004). *A world wide review of the commercial production of biodiesel – A technological, economic and ecological investigation based on case studies*. Schriftenreihe Umweltschutz und Ressourcenökonomie. Band 41. Viena: Institut für Technologie und nachhaltiges Produktmanagement der Wirtschaftsuniversität. 150 pp.

FRIENDS OF THE EARTH. (2005). *Greasy palms. The social and ecological impacts of large-scale oil palm plantation development in Southeast Asia*. London: Friends of the Earth. 52 pp.

FRONDEL M., PETERS J. (2006). «Biodiesel: A new Oildorado?» *Energy Policy* (en prensa).

FUDUKA H., KONDO A., NODA H. (2001). «Biodiesel fuel production by transesterification of oils». *Journal of Bioscience and Bioengineering* 92(5): 405–16.

GOERING C.E., SCHWAB A.W., DAUGHERTY M.J., PRYDE E.H., HEAKIN A.J. (1982). Fuel properties of eleven vegetable oils. *Transactions of the ASAE* 25: 1472-1477 & 1483.

GONZÁLEZ DEL VALLE A.M. (2004). Informe final: Estimación de la valoración económica de los impactos de la contaminación atmosférica por PTS y PM10 en la salud de la población de Lima Metropolitana. Lima: CONAM. Noviembre de 2004.

GRABOSKI M.S., MCCORMICK R.L., ALLEMAN T.L., HERRING A.M. (2003). The Effect of Biodiesel Composition on Engine Emissions from a DDC Series 60 Diesel Engine - Final Report: Report 2 in a series of 6. NREL/SR-510-31461. Golden, Colorado: National Renewable Energy Laboratory.

GRUPO TÉCNICO DE BIOCOMBUSTIBLES. (2002). *Informe: Propuesta para la promoción del uso de biocombustibles líquidos en el Perú*. Lima: CONAM. Noviembre de 2002.

GUNSTONE F.D., HARWOOD J.L., PADLEY F.B. (1994). *Lipid Handbook*. Segunda Edición. Londres: Chapman & Hall.

HELLER J. (1996). Physic nut. *Jatropha curcas* L. Promoting the conservation and use of underutilized and neglected crops. Gatersleben, Alemania: Institute of Plant Genetics and Crop Plant Research, y Roma: International Plant Genetic Resources Institute. 66 pp.

HENNIGES O., ZEDDIES J. (2006). «Bioenergy and agriculture: Promises and challenges». *Bioenergy in Europe: Experiences and prospects. Focus 14*, Brief 9 of 12. Washington: International Food Policy Research Institute. 2 pp.

HENNING R. (1998). *Use of jatropha curcas: a household perspective and its contribution to rural employment creation*. Ponencia en Regional Workshop on the Potential of *Jatropha Curcas* in Rural Development & Environmental Protection. Harare, Zimbabwe.

HOENEISEN, B. (1997). *¿Y dónde está el carbono?*. En: http://www.usfq.edu.ec/1PROFESORES/Hoeneisen/Ecuador_2050/CARBON_V2.HTM Quito: Universidad San Francisco de Quito.

IEA. (2001). *CO₂-Emissions from Fuel Combustion, 1971-1999*. Paris: IEA.

IEA. (2002). *World Energy Outlook 2002*. Paris: IEA. 530 pp.

IEA. (2004). *World Energy Outlook 2004*. Paris: IEA. 570 pp.

IEA. (2005). *30 Key Energy Trends in the IEA and worldwide*. Paris: IEA. 35 pp.

IEA. (2006a). *Key World Energy Statistics*. Paris: IEA. 79 pp.

IEA. (2006b). *World Energy Outlook 2006 – Summary and Conclusions*. Paris: IEA. 15 pp.

IIPROFRUTH. (2007). La canola en la zona altoandina del Perú. Boletín de Noticias. Lima: IIPROFRUTH. Abril 2007.

- INEI. (2005). *Perú: Compendio Estadístico 2005*. Lima: INEI. 956 pp.
- INNOVATION, ENERGIE, ENVIRONNEMENT. (2007). *New energy technologies*. En: http://www.ifp.fr/IFP/en/ifp/ab04_02.htm.
- INSTITUTE FOR PLASMA PHYSICS RIJNHUIZEN. (2005). *Energy, powering your world*. Nieuwegein (Holanda): Institute for Plasma Physics Rijnhuizen. 60 pp.
- IOWA STATE UNIVERSITY. (2004). *What is biodiesel?* Ames: Mechanical Engineering Department, Iowa State University. URL: <http://www3.me.iastate.edu/biodiesel/Pages/biodiesel1.html>
- IPCC. (1996). *Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. National Greenhouse Gas Inventories Programme.
- IPCC. (2001). *Technical Summary of the Working Group I Report*. 83 pp.
- IPCC. (2007). *Climate change 2007: The physical science basis. Summary for policymakers. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC*. Ginebra: IPCC. 21 pp.
- ITDG. (2002). *Sustainable Energy for Poverty Reduction: an Action Plan*. Rugby and London: ITDG and Greenpeace International. 65 pp.
- JANULIS P. (2004). Reduction of energy consumption in biodiesel fuel life cycle. *Renewable Energy* 29 (2004) 861–871.
- JUNGMEIER G., KOENIGHOFER K., VARELA M., LAGO C. (2005). *Economic and Environmental Performance of Biofuels*. Work Package 2, VIEWLS Project. Clear Views on Clean Fuels: Data, Potential, Scenarios, Markets and Trade of Biofuels, EC Project NNE5-2001-00619.
- KIM S., DALE B.E. (2005). «Life cycle assessment of various cropping systems utilized for producing biofuels: Bioethanol and biodiesel». *Biomass and Bioenergy* 29: 426–439.
- KÖRBITZ W. (2002). *New trends in developing biodiesel*. Presentación en Asia Bio-Fuels, Singapur, 22-23 Abril 2002.
- KUMMETZ P. (2006). *Biodiesel: impuestos para todos*. Deutsche Welle Online: <http://www.dw-world.de/dw/article/0,2144,2116305,00.html>. Publicado el 01/08/2006.
- LA REPÚBLICA. (2007). *Critican expansión del etanol*. Nota publicada en el diario el 23/03/2007.
- LAPINSKIENÉ A., MARTINKUS P., RÉBZDAITÉ V. (2006). «Eco-toxicological studies of diesel and biodiesel fuels in aerated soil». *Environmental Pollution* 142: 432-437.

LAWSON H. (1994). *Aceites y grasas alimentarios - Tecnología, utilización y nutrición*. Zaragoza: Editorial Acribia. 333 pp.

LI L., DU W., LIU D., WANG L., LI Z. (2006). «Lipase-catalyzed transesterification of rapeseed oils for biodiesel production with a novel organic solvent as the reaction medium». *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*. (en prensa).

LIN Y.C., LEE W.J., WU T.S., WANG C.T. (2006). «Comparison of PAH and regulated harmful matter emissions from biodiesel blends and paraffinic fuel blends on engine accumulated mileage test». *Fuel* 85: 2516–2523.

MA F., CLEMENTS L.D., HANNA M.A. (1998). «The effect of catalyst, free fatty acids, and water on transesterification of beef tallow». *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 41(5): 1261–4.

MA F., HANNA M.A. (1999). «Biodiesel production: a review». *Bioresource Technology* 70: 1–15.

MARCHETTI J.M., MIGUEL V.U., ERRAZU A.F. (2006). «Possible methods for biodiesel production». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (en prensa).

MATTHEWS W.G., O'CONNOR D. (2006). *Analizar la Aplicabilidad de los Biocombustibles en el Perú*. Lima: Ministerio de Energía y Minas – Dirección General de Hidrocarburos. Peru Hydrocarbon Assistance Project. 74 pp.

MATTHYS D. (2003). *Producing Biodiesel A Simple Affair? A Practical Guide To Read Before Building Your Plant*. Ghent, Bélgica: American Soybean Association. 23 pp.

MEHER L.C., VIDYA SAGAR D., NAIK S.N. (2006). «Technical aspects of biodiesel production by transesterification – a review». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 10: 248-268.

MEM. (2005a). *Plan Referencial de Hidrocarburos 2005 - 2014*. Lima: Ministerio de Energía y Minas.

MEM. (2005b). *Plan Nacional de Electrificación Rural 2005 - 2014*. Lima: Ministerio de Energía y Minas, Dirección Ejecutiva de Proyectos.

MEM. (2006). *Balance Nacional de Energía 2004*. Lima: Ministerio de Energía y Minas, Oficina de Planeamiento y Políticas Sectoriales. 185 pp.

MEM. (2007a). *Balance Nacional de Energía 2005*. Lima: Ministerio de Energía y Minas, Oficina de Planeamiento y Políticas Sectoriales. 197 pp.

MEM. (2007b). *Nota de prensa del 28 de febrero del 2007: Ministro Juan Valdivia: está listo Reglamento de biocombustibles*. Lima: Ministerio de Energía y Minas, Oficina de Prensa.

MINISTERIO DE AGRICULTURA. (n/d). *Líneas de cultivos emergentes* En: Portal Agrario – http://www.minag.gob.pe/promisoria_3.shtml Lima: Ministerio de Agricultura.

MITTELBACH M. (1996). Diesel fuel derived from vegetable oils, VI: Specifications and quality control of biodiesel. *Bioresource Technology* 56: 7-11.

MODI V., MCDADE S., LALLEMENT D., SAGHIR J. (2006). Energy and the Millennium Development Goals. New York: Energy Sector Management Assistance Programme, United Nations Development Programme, UN Millennium Project, World Bank.

MOHEDANO J.E. (2002). *Energía e Historia: pocos recursos y muchos residuos*. URL: <http://www.redcientifica.com/doc/doc200210070300.html>

MONBIOT G. (2006). *Biodiésel: Peor que los combustibles fósiles*. URL: <http://www.ecoport.net/content/view/full/55929>

MORRIS R.E., POLLACK A.K., MANSELL G.E., LINDHJEM C., JIA Y., WILSON G. (2003). Impact of Biodiesel Fuels on Air Quality and Human Health - Summary Report September 16, 1999–January 31, 2003. NREL/SR-540-33793. Golden, Colorado: National Renewable Energy Laboratory.

MORTIMER, Ch. 1983. *Química*. Grupo Editorial Iberoamericana. México D. F.

NELSON L.A., FOGLIA T.A., MARMER W.N. (1996). «Lipase catalyzed production of biodiesel». *Journal of the American Oil Chemists' Society* 73(8): 1191–5.

NELSON R.G., SCHROCK M.D. (2006). Energetic and economic feasibility associated with the production, processing and conversion of beef tallow to a substitute diesel fuel. *Biomass and Bioenergy* 30: 584-591.

NTB LIQUID BIOFUELS NETWORK. URL: <http://www.nf-2000.org.html>

PANOS. (2006). *Fuelling controversy – can biofuels slow the speed of climate change?* PANOS Media Toolkit on Climate Change No. 1. London: PANOS. 6 pp.

PASQUALINO J.C., MONTANE D., SALVADO J. (2006). «Synergic effects of biodiesel in the biodegradability of fossil-derived fuels». *Biomass and Bioenergy* (en prensa).

PÉREZ G. (2003). *Analysis of enzymatic alcoholysis reaction with vegetable oils*. Tesis de maestría, febrero 2003.

PIMENTEL D., PATZEK T.W. (2005). «Ethanol Production Using Corn, Switchgrass, and Wood; Biodiesel Production Using Soybean and Sunflower». *Natural Resources Research* 14 (1): 65-76.

POKU K. (2002). Small-scale palm oil processing in Africa. FAO Agricultural Services Bulletin 148. Roma: FAO.

PRADO L. (2006). *El Programa Brasileiro de Biodiésel es malo para los muy pobres en áreas rurales*. Medio Ambiente Online: <http://www.medioambienteonline.com/site/root/resources/analysis/4210.html> (Publicado el 10/10/2006).

PRANKL H. (2000). *Standardisation of Biodiesel*. Final Report of NTB-net Phase IV / Topic 1. Wieselburg, Austria: Federal Institute of Agricultural Engineering. 37 pp.

PROGRAMA SIERRA EXPORTADORA (2007). Plan de Acción del Programa de la Canola y Biocombustibles. URL: <http://www.sierraexportadora.gob.pe/canolaplanaccion.html>

REHM S., ESPIG G. (1991). *The cultivated plants of the tropics and subtropics: Cultivation, economic value, utilization*. Weikersheim, Alemania: Verlag Josef Margraf. 552 pp.

RIBEIRO P.C. (2004). *O biodiesel e a inclusão social*. Brasília: Câmara dos Deputados do Brasil. 33 pp.

RYAN L., CONVERY F., FERREIRA S. (2006). «Stimulating the use of biofuels in the European Union: Implications for climate change policy». *Energy Policy* 34: 3184–3194.

ROCCHIETTA C. (2001). *Biodiesel – European overview*. Presentación en el 72 Congreso Mundial de la IASC, Sydney, Australia, 20 Setiembre 2001.

SÁENZ A. (2003). *Situación y avances del plan nacional de promoción de palma aceitera en el Perú*. Lima: Ministerio de Agricultura – Programa para el Desarrollo de la Amazonía. Junio 2003.

SÁENZ A. (2005). *Situación y avances del plan nacional de promoción de la palma aceitera*. Lima: Ministerio de Agricultura – Programa para el Desarrollo de la Amazonía. Julio 2005.

SCHWEITHELM J. (1999). *The Fire This Time: An Overview of Indonesia's Forest Fire in 1997/98*. WWF Indonesia.

SHAY E.G. (1993). «Diesel fuel from vegetable oil: status and opportunities». *Biomass Bioenergy* 4(4): 227–42.

SHEEHAN J., CAMOBRECO V., DUFFIELD J., GRABOSKI M., SHAPOURI H. (1998). *An overview of biodiesel and petroleum diesel life cycles*. National Renewable Energy Laboratory of U.S. Department of Energy (DOE), U.S.A.

SHIMADA Y., WATANABE Y., SUGIHARA A., TOMINAGA Y. (2002). «Enzymatic alcoholysis for biodiesel fuel production and application of the reaction to oil processing». *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic* 17: 133–42.

SRIVASTAVA A., PRASAD R. (2000). «Triglycerides-based diesel fuels». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 4: 111-133.

TACCONI L. (2003). *Fires in Indonesia: Causes, Costs and Policy Implications*. CIFOR Occasional Paper No. 38.

TOMASEVIC A.V., MARINKOVIC S.S. (2003). «Methanolysis of used frying oils». *Fuel Process Technology* 81: 1–6.

TRATADO DE COOPERACIÓN AMAZÓNICA. (1997). *Cultivo de Frutales Nativos Amazónicos*. Lima: Tratado de Cooperación Amazónica.

PNUD, UNDESA, World Energy Council. (2000). *World Energy Assessment: Energy and the Challenge of Sustainability*. New York: PNUD.

PNUD, UNDESA, World Energy Council. (2004). *World Energy Assessment: Overview 2004 Update*. New York: PNUD. 85 pp.

UNIVERSIA COLLEGE AT WHARTON. (2006). *Causas del encarecimiento del petróleo y posibles soluciones*. En: <http://www.wharton.universia.net/index.cfm?fa=viewfeature&id=1154&language=spanish> Publicado el 05/03/2006.

VAN GERPEN J. (2005). «Biodiesel processing and production». *Fuel Processing Technology* 86: 1097–1107.

VAN KASTEREN J.M.N., NISWORO A.P. (2006). «A process model to estimate the cost of industrial scale biodiesel production from waste cooking oil by supercritical transesterification». *Resources, Conservation and Recycling* (en prensa).

VAYDA A.P. (1998). *Finding Causes of the 1997-98 Indonesian Forest Fires: Problems and Possibilities*. Report for WWF Indonesia.

VILLACHICA H. (1996). *Frutales y hortalizas promisorios de la Amazonía*. Lima: Tratado de Cooperación Amazónica.

VINAYAK P., SINGH K. (1998). «Cultivation and marketing of *Jatropha curcas* through agro-forestry co-operatives in Maharashtra». Ed: Gayathri V. y H.S. Mukunda. *Biomass Users Network (Vol. 2.3)*. Bangalore: Indian Institute of Science.

WANG Y., OU S., LIU P., ZHANG Z. (2006). «Preparation of biodiesel from waste cooking oil via two-step catalyzed process». *Energy Conversion and Management* (en prensa).

WEC. (2004). *Survey of Energy Resources 2004*. London: World Energy Council. En: <http://www.worldenergy.org/wec-geis/publications/reports/ser04/fuels.asp?fuel=Wood%20Fuels>

WESTFALIA SEPARATOR FOOD TEC. (2006). *Pre-treatment of oils and fats for biodiesel production*. Oelde, Alemania: Westfalia Separator Food Tec GmbH. 13 pp.

WÖRGETTER M., LECHNER M., RATHBAUER J. (1999). *Ökobilanz biodiesel*. Wieselburg: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft

WORLDWATCH INSTITUTE. (2006). *Biofuels for transportation – Global potential and implications for sustainable agriculture and energy in the 21st century*. Extended summary. Washington, D.C.: Worldwatch Institute. 37 pp.

WRI. (1987). *Last frontier forests: Interactive forest maps*. Washington: WRI. URL: http://multimedia.wri.org/frontier_forest_maps/index.html

WRM. (2006). «Perú: La Amazonía amenazada por proyectos de plantaciones de palma aceitera». *Boletín N° 109 del WRM*, agosto de 2006. <http://www.wrm.org.uy/boletin/109/opinion.html>

ZHANG Y., DUBEE M.A., MCLEAN D.D., KATES M. (2003). «Biodiesel production from waste cooking oil: 1. Process design and technological assessment». *Bioresource Technology* 89 (2003) 1–16.

ZHOU W., KONAR S.K., BOOCOCK D.G.V. (2003). «Ethyl esters from the single-phase base-catalyzed ethanolysis of vegetable oils». *Journal of the American Oil Chemists' Society* 80(4): 367–71.

ANEXOS

Anexo I:

**ANÁLISIS DE LA INDUSTRIA
DE BIODIÉSEL EN COLOMBIA,
ECUADOR Y PERÚ**

Francisco Toledo-Santander

Evaluación de las regiones para la producción y comercialización de biodiésel

Se elaboró una herramienta de análisis para calificar cada característica que fuese relevante a la industria de biodiésel en Colombia, Ecuador y Perú. Esta herramienta permite la comparación de propiedades similares en cada país. Aún cuando algunas características son intrínsecamente subjetivas, se minimizó este efecto guiando al evaluador a través de las mismas preguntas para cada país.

Debido a que el Perú tiene dos grandes regiones que han sido revisadas en este estudio (costa y selva) y que las leyes de promoción son diferentes para cada una de estas regiones, se ha dividido el Perú en dos regiones dentro de la herramienta de evaluación y que serán comparadas frente a Colombia y Ecuador.

Teniendo en cuenta que vivimos un mercado global/regional, se presenta un conjunto de descriptores que evalúan características en dos dimensiones: 1) Atractivo para la producción de biodiésel y 2) Atractivo para la comercialización de biodiésel. Esto se debe a que se podría dar el caso de que se produzca biodiésel en un país y se venda en otro.

Un peso entre 0 y 1 ha sido asignado para cada descriptor asociado al atractivo para la producción de biodiésel y al atractivo para la comercialización de biodiésel. De igual forma se permite asignar una calificación entre -5 y +5, tal como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 1: Calificativos para cada descriptor

Instrucciones:
Por favor califique cada descriptor según el criterio indicado abajo
N = Not aplicable (aún)
-5 = Prohibitivo
-4 = Valor extremo en contra
-3 = Valor alto en contra
-2 = Valor medio en contra
-1 = Valor bajo en contra
0 = Neutral
1 = Valor bajo a favor
2 = Valor medio a favor
3 = Valor alto a favor
4 = Valor extremo a favor
5 = Valor absoluto a favor
Indicar valores exactos si el descriptor así lo solicita

Los descriptores han sido agrupados de acuerdo a las áreas de evaluación. De esta forma se tiene conjuntos agrupados por áreas de:

- Industria de combustibles fósiles
- Política y legal
- Económica
- Social y ambiental
- Tecnología
- Industria de biodiésel
- Cultivos específicos de oleaginosas

Un conjunto de descriptores del área política y legal se muestra a continuación.

Tabla 2: Conjunto de descriptores para las condiciones políticas y legales

Condiciones políticas y legales	Peso		Colombia	Ecuador	Perú - costa	Perú - selva
	Producción	Comercia.				
	Producción	Comercia.				
			1,52	0,25	0,20	0,81
			1,82	0,13	0,65	0,65
Obligatoriedad en mezcla de biodiésel en diésel	1	1	5,00%	N	5,00%	5,00%
Posible mezcla a futuro de biodiésel en diésel	0,9	0,9	20,00%	N	20,00%	20,00%
Precio máximo estimado de venta (por Tn)	0,3	1	650,2	267,6	626,1	626,1
Salario mínimo	0,9	0	2,964,7	2,400,0	2,665,9	2,665,9
Nivel de maduración del marco legal para BD	0,8	0,9	4	1	1	1
Subsidios e incentivos para la producción de BD	0,9	0	3	-3	-3	-3
Subsidios e incentivos para la comercialización de BD	0	0,9	4	-3	-3	-3
Otros incentivos para la producción de biodiésel	0,8	0	0	0	0	3
Otros incentivos para la comercialización de biodiésel	0	0,8	2	0	0	0
Incentivos para las actividades de agricultura	0,9	0	2	2	-1	4
Madurez en las instituciones del estado para la promoción de BD	0,5	0,5	2	-1	-1	-1
Productores existentes dentro de la cadena de valor	0,2	0,3	2	N	2	2
Controles para el biodiésel dentro de la cadena de valor	0	0,3	-1	N	-1	-1
Regulaciones para el comercio internacional	0,9	0,9	2	1	2	2

Tal como se observa, algunos descriptores requieren un valor directo distinto del rango de calificaciones.

Después de analizar las regiones bajo todos los descriptores dentro de cada área, se obtuvo un resultado final mostrado en la siguiente tabla.

Tabla 3. Resumen de resultados de cada región

		Colombia	Ecuador	Perú - costa	Perú - selva
Atractivo para la producción	--- >	7,43	6,21	8,09	7,60
Atractivo para la comercialización	--- >	8,25	5,60	7,89	7,87
Industria de combustibles fósiles	Producción	1,53	1,90	2,02	2,02
	Comercialización	1,59	1,55	2,89	2,89
Condiciones políticas y legales	Producción	1,52	0,25	0,20	0,81
	Comercialización	1,82	0,13	0,65	0,65
Condiciones económicas	Producción	1,53	0,66	1,29	1,24
	Comercialización	1,30	0,71	1,09	1,06
Condiciones sociales y ambientales	Producción	0,78	1,97	2,25	1,01
	Comercialización	1,45	1,20	1,20	1,20
Condiciones técnicas	Producción	1,22	0,38	1,02	1,22
	Comercialización	N	N	N	N
Industria de biodiésel	Producción	0,42	0,52	0,65	0,65
	Comercialización	1,05	1,00	1,03	1,03
Cultivo - <i>Jatropha curcas</i>	Producción	N	N	1,19	1,48
Cultivo - Algas	Producción	N	N	1,45	NO GO

Este resultado muestra que en términos del mercado de combustibles fósiles, Perú tiene un mayor atractivo para una industria de biodiésel que los otros dos países. La producción es más atractiva en Ecuador pero está muy cercana a Perú debido a que en Perú existe un alto nivel de importaciones de diésel y a la existencia de grandes consumidores directos. Esto permite dos posibles escenarios: 1) Buscar el reemplazo total de importaciones de diésel por una producción local de biodiésel y 2) Buscar proveer biodiésel al 100% a los grandes consumidores directos.

Según las condiciones políticas y legales, Colombia está delante de Ecuador y Perú. Esto se debe a que Colombia tiene un conjunto completo de leyes y regulaciones para la promoción y control de biodiésel. Dichas regulaciones están orientadas a incentivar al desarrollo de la industria de biodiésel.

En términos de las condiciones económicas, se observa que las inversiones locales y la inversión directa extranjera ha estado incrementándose en los tres países. El crecimiento del producto bruto interno es alto en Perú y en Colombia con niveles estables de inflación en los tres países. Esto favorece especialmente a Colombia, dado que inversiones directas extranjeras pasadas muestran la confianza depositada en el gobierno colombiano.

Los resultados en cuanto a las condiciones sociales y ambientales se han visto fuertemente influenciados por la situación de seguridad en todas las regiones. Esto muestra que la región más segura para la producción de biodiésel es la costa peruana. Colombia y la selva peruana aún presentan una amenaza por la presencia de cultivos ilícitos que deben ser analizados en detalle antes de planear una plantación industrial para la producción de biodiésel.

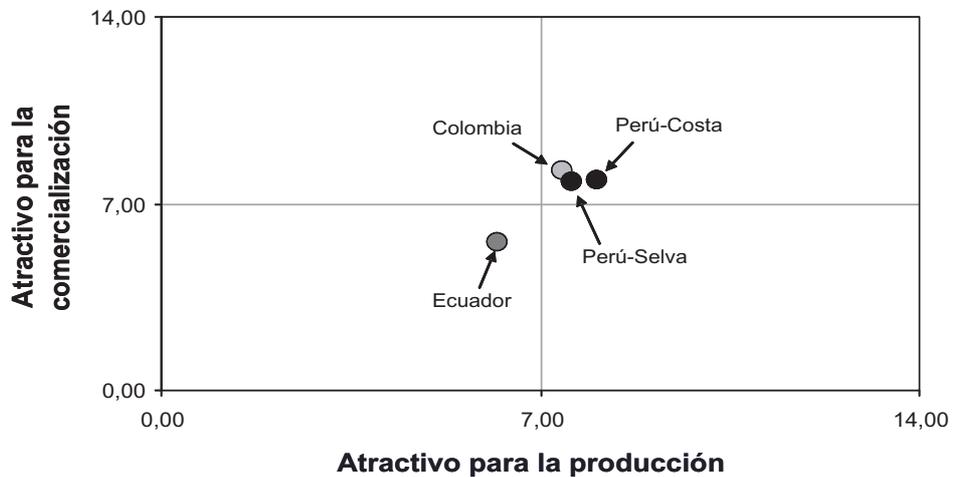
En términos de condiciones tecnológicas, tanto Colombia como la selva peruana tienen incentivos para la adopción de tecnología y también para el desarrollo de la misma que podría beneficiar la producción de biodiésel.

La industria de biodiésel se encuentra en sus estados iniciales por lo que los tres países se encuentran en la misma posición tanto para la producción como para la comercialización del mismo.

En relación a los posibles cultivos, se determina que la *Jatropha curcas* puede ser cultivada en ambas regiones del Perú, pero tiene una mayor ventaja en la selva peruana.

Basado en el resultado global de la herramienta, se ha elaborado un gráfico que muestra en diferentes ejes los niveles de atractivo para la comercialización y la producción de biodiésel para cada región. La escala en cada eje está entre 0 y 14, según los valores extremos que la herramienta proporciona.

Figura 1: Posicionamiento estratégico para la industria de biodiésel



OPCIONES PARA LA PRODUCCIÓN Y USO DE BIODIÉSEL EN EL PERÚ

El gráfico ilustra que tanto la producción como la comercialización son atractivas en Perú y Colombia. Existen diferencias menores entre Colombia y Perú donde se indica que es mas atractivo comercializar en Colombia y producir en Perú. Esto podría significar que se produzca en Perú para vender en Colombia, sin embargo, debido a que los costos de transporte podrían llegar a ser importantes y que las diferencias de atractivo no son grandes, se recomienda producir y comercializar en el mismo país/región.

Dentro de Perú, aún cuando se tienen incentivos para las actividades de agricultura en la selva, el problema de seguridad hace que el atractivo de producción disminuya comparativamente con la región de la costa peruana.

Un análisis posterior sobre otras regiones y/o países podrían hacerse utilizando la misma herramienta y comparándolas con el análisis hecho con Colombia, Ecuador y Perú.

Anexo II: Galería fotográfica

EL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL

SEMILLAS: insumos para la preparación del biodiésel.



Ricino o higuera
(*Ricinus communis*)



Colza
(*Brassica napus*)



Piñon o tempate
(*Jatropha curcas*)



Girasol
(*Helianthus annuus*)

1 El ACEITE es la principal materia prima para producir el biodiésel.



Aceite usado del comedor universitario de la UNALM.



Colocando el aceite para empezar el proceso.



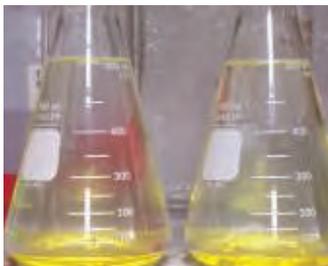
2 TITULACIÓN: en esta etapa se calcula la cantidad de catalizador a utilizar y se mide la acidez del aceite.



Preparando muestra de aceite para titular.



Neutralización del alcohol.



Mezcla de aceite con alcohol (etanol) antes de titular.



Titulación.



Cambio de color del aceite al llegar a su índice de acidez.

3 DISOLUCIÓN DEL CATALIZADOR: es la mezcla del alcohol (metanol) con el catalizador (hidróxido de sodio o potasio) con el fin de disolver este producto sólido.



Cálculo de la cantidad de catalizador que se va a mezclar con el alcohol (pesado).



Pesado del catalizador.

Luego se mezcla el catalizador con el alcohol.

4 **TRANSESTERIFICACIÓN.** Nombre que se le da a la reacción química que separa la glicerina del aceite.



Mezcla del alcohol y catalizador con el aceite.



Cambio de color del aceite en los primeros segundos de mezcla.



Momentos finales de la reacción.

5 DECANTACIÓN: en esta etapa se separa el biodiésel de la glicerina.



Separación de fases biodiésel / glicerina.

6 PURIFICACIÓN. En esta etapa se eliminan los residuos que quedaron luego del proceso.



El biodiésel se lava con agua dos o tres veces, se seca y se filtra.



Lavado del biodiésel.



Separación manual del biodiésel.

7 PRODUCTO FINAL



Muestras de biodiésel de diferentes materias primas (de izquierda a derecha; aceite de soya RBD, aceite de palma RBD y aceite de palma crudo).

RESUMEN DE TODO EL PROCESO

Todo el proceso visto desde las semillas de donde se puede extraer el aceite hasta el producto final.



(De izquierda a derecha)
Semillas de ricino, piñón y canola, aceite usado, separación de fases, lavado de biodiésel y biodiésel seco y filtrado.

OTRAS PUBLICACIONES DE LA SERIE LIBROS DE SOLUCIONES PRÁCTICAS - ITDG

·Serie Libros # 50:

Tecnologías respondiendo a los desastres

·Serie Libros # 49:

Vulnerabilidad: el entorno social, político y económico de los desastres

·Serie Libros # 48:

Tecnología y vivienda popular

·Serie Libros # 47:

The network for social studies on disaster prevention in Latin America.
Research Agenda and Constitution

·Serie Libros # 46:

Plan de Desarrollo Distrital de La Encañada 1999-2008. CODE

·Serie Libros # 45:

Plan Estratégico de Desarrollo Distrital. Distrito de La Banda del Shilcayo. 1999-2003

·Serie Libros # 44:

Los desastres no son naturales

·Serie Libros # 43:

Las municipalidades y su papel en la democratización y el desarrollo del país

·Serie Libros # 42:

La pequeña agroindustria en el Perú desde la experiencia de ITDG

·Serie Libros # 41:

La parcela integral familiar: PIF

Para mayor información por favor dirigirse a:

Av. Jorge Chávez 275, Miraflores, Lima, Perú.

Teléfonos: (51-1) 4447055, 4475127, 4467324, 2429714, Fax: (51-1) 4466621

Personas de contacto:

Efraín Peralta (eperalta@solucionespracticas.org.pe)

Giannina Solari (gsolari@solucionespracticas.org.pe)

Soluciones Prácticas - ITDG es un organismo de cooperación técnica internacional que contribuye al desarrollo sostenible de la población de menores recursos, mediante la investigación, aplicación y disseminación de tecnologías apropiadas. Tiene oficinas en África, Asia, Europa y América Latina. La oficina regional para América Latina tiene sede en Lima, Perú y trabaja a través de sus programas de Sistemas de producción y acceso a mercados; Energía, infraestructura y servicios básicos; Prevención de desastres y gobernabilidad local; Nuevas tecnologías y el Área de comunicación e información.

SOLUCIONES PRÁCTICAS

I T D G

Tecnologías desafiando la pobreza



ISBN: 978-9972-47-136-0



9 789972 471360