



**PERSPECTIVAS PARA EL BIODIESEL EN CENTROAMÉRICA:  
COSTA RICA, EL SALVADOR, GUATEMALA Y HONDURAS**

*CONVENIO CEPAL / REPÚBLICA FEDERAL ALEMANA*

---

Este estudio fue elaborado por el consultor Waldyr Luiz Ribeiro Gallo, en el marco del Proyecto “Inception Workshop for the Implementation of the Strategic Partnership”, Convenio CEPAL/República Federal Alemana. Las opiniones expresadas en este documento, que no ha sido sometido a revisión editorial, son de exclusiva responsabilidad del autor y pueden no coincidir con las de la Organización.

## ÍNDICE

	<u>Página</u>
INTRODUCCIÓN .....	1
1. Objetivos.....	1
2. Delimitación de los temas tratados.....	1
3. Metodología.....	2
4. Estructura del informe .....	2
I. EL BIODIESEL Y SUS CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS.....	5
1. Producción mundial de aceites vegetales y su productividad .....	6
2. Los aceites vegetales y los motores diesel .....	9
3. El biodiesel: definición y características técnicas .....	14
4. La producción de biodiesel.....	23
5. La calidad del biodiesel y sus efectos en el motor .....	34
6. Otras tecnologías para modificar aceites vegetales .....	37
II. EXPERIENCIA INTERNACIONAL CON BIODIESEL .....	40
1. La Unión Europea .....	41
2. El biodiesel en Estados Unidos, Canadá, Australia y Japón .....	46
3. Los países no-OECD de Asia: India, China, Malasia, Tailandia e Indonesia ..	49
4. Países de América Latina .....	52
III. ESTIMACIONES DE COSTOS Y PRECIOS PARA EL BIODIESEL.....	56
1. Costos y precios de materias primas para el biodiesel .....	57
2. Costos de producción del biodiesel .....	64
3. Formación de precios para el biodiesel: costos, márgenes y tasas .....	72
4. Comparación: precios de petróleo, diesel y de biodiesel .....	78
IV. PERSPECTIVAS PARA EL BIODIESEL EN COSTA RICA .....	81
1. Características socio-económicas del país.....	81
2. Características agrícolas del país.....	82
3. Matriz energética y mercado de hidrocarburos .....	90
4. La producción actual de biodiesel .....	93
5. Aspectos institucionales: marcos legales y de regulación.....	93
6. Escenarios para producción de biodiesel.....	95

V.	PERSPECTIVAS PARA EL BIODIESEL EN EL SALVADOR .....	100
1.	Características socio-económicas del país.....	100
2.	Características agrícolas del país.....	102
3.	Matriz energética y mercado de hidrocarburos .....	108
4.	La producción actual de biodiesel .....	111
5.	Aspectos institucionales: marcos legales y de regulación.....	112
6.	Escenarios para producción de biodiesel.....	112
VI.	PERSPECTIVAS PARA EL BIODIESEL EN GUATEMALA.....	118
1.	Características socio-económicas del país.....	118
2.	Características agrícolas del país.....	119
3.	Matriz energética y mercado de hidrocarburos .....	126
4.	La producción actual de biodiesel .....	128
5.	Aspectos institucionales: marcos legales y de regulación.....	130
6.	Escenarios para producción de biodiesel.....	131
VII.	PERSPECTIVAS PARA EL BIODIESEL EN HONDURAS.....	137
1.	Características socio-económicas del país.....	137
2.	Características agrícolas del país.....	138
3.	Matriz energética y mercado de hidrocarburos .....	144
4.	La producción actual de biodiesel .....	150
5.	Aspectos institucionales: marcos legales y de regulación.....	151
6.	Escenarios para producción de biodiesel.....	152
VIII.	RECOMENDACIONES GENERALES Y CONCLUSIONES.....	160
1.	Condiciones generales para la introducción del biodiesel.....	160
2.	Cuestiones ambientales y de sostenibilidad .....	163
3.	Recomendaciones de carácter general.....	166
4.	Conclusión.....	170
	BIBLIOGRAFÍA.....	171
	ANEXOS .....	183
	<u>Cuadros:</u>	
Cuadro 1	Producción mundial de oleaginosas. ....	6
Cuadro 2	Producción mundial de aceites y grasas .....	6
Cuadro 3	Especies oleaginosas .....	7
Cuadro 4	Composición típica de un aceite vegetal crudo .....	8
Cuadro 5	Usos de los aceites vegetales.....	8
Cuadro 6	Comparación de propiedades: diesel, aceites y biodiesel.....	11

Cuadro 7	Problemas en el motor diesel con uso de aceites vegetales.....	13
Cuadro 8	Algunas propiedades de ácidos grasos .....	18
Cuadro 9	Propiedades de mono-alkil ésteres puros .....	18
Cuadro 10	Propiedades del biodiesel en función de su composición .....	19
Cuadro 11	Especificaciones de diesel y biodiesel: EUA y UE.....	21
Cuadro 12	Cantidad de biodiesel obtenida de 1000 kg de aceite.....	26
Cuadro 13	Empresas que fabrican equipo para biodiesel. ....	30
Cuadro 14	Biodiesel: ¿etanol o metanol?.....	33
Cuadro 15	Diferencias entre el biodiesel metílico y etílico .....	34
Cuadro 16	Las características del biodiesel y problemas en los motores .....	36
Cuadro 17	Compatibilidad entre biodiesel y elastómeros.....	37
Cuadro 18	Rendimientos de pirolisis de aceites vegetales y grasas de ganado .....	38
Cuadro 19	Comparación de propiedades: diesel y productos de pirolisis.....	38
Cuadro 20	Estimaciones de la producción mundial de biodiesel .....	40
Cuadro 21	Capacidad productiva y consumo de biodiesel en Alemania .....	42
Cuadro 22	Las nuevas tasas para el biodiesel y aceites vegetales combustibles .....	43
Cuadro 23	Producción de biodiesel en los Estados Unidos .....	47
Cuadro 24	Costos de oleaginosas en Brasil .....	58
Cuadro 25	Precios internacionales de oleaginosas, 2005 a septiembre 2006 .....	59
Cuadro 26	Costos de producción de aceites vegetales.....	60
Cuadro 27	Costo del aceite de palma en función de la edad de las fincas.....	60
Cuadro 28	Precios internacionales de aceites, 2005 a septiembre 2006.....	61
Cuadro 29	Costos de inversión: plantas de pequeño porte.....	65
Cuadro 30	Costo de inversión: plantas de gran porte.....	66
Cuadro 31	Costos de producción de biodiesel .....	68
Cuadro 32	Precios internacionales de harinas de oleaginosas, octubre 2005 a septiembre 2006.....	69
Cuadro 33	Estimaciones de costos de biodiesel – hipótesis. ....	71
Cuadro 34	Estimaciones de costos de biodiesel – resultados (US\$/ton).....	72
Cuadro 35	Impuestos sobre el diesel y exenciones vigentes para biodiesel. ....	73
Cuadro 36	Costo adicional del biodiesel y precios de petróleo. ....	79
Cuadro 37	Costa Rica: Indicadores socio-económicos y de uso de tierras.....	82
Cuadro 38	Costa Rica: Balance comercial total y deuda externa .....	82
Cuadro 39	Costa Rica: Mayores extensiones de tierras para cosechas .....	83
Cuadro 40	Costa Rica: Producción agrícola de granos y productos de exportación.....	84
Cuadro 41	Costa Rica: Importaciones agrícolas de Costa Rica .....	84
Cuadro 42	Costa Rica: Consumo aparente y grado de dependencia de importaciones .....	85
Cuadro 43	Costa Rica: Principales exportaciones agropecuarias .....	86
Cuadro 44	Costa Rica: Producción de palma africana (frutos) y aceite de palma .....	88
Cuadro 45	Costa Rica: Parámetros de rendimiento de la palma según su edad.....	88
Cuadro 46	Costa Rica: Indicadores energéticos.....	90
Cuadro 47	Costa Rica: Ventas totales de gasolina y diesel, 2006.....	91
Cuadro 48	Costa Rica: Precios al consumidor de gasolinas y diesel .....	92
Cuadro 49	Costa Rica: Estructura de precios de algunos combustibles .....	92
Cuadro 50	Costa Rica: Proyecciones de uso de biodiesel: volúmenes e incremento de área de siembra de palma.....	96

Cuadro 51	Costa Rica: Estimaciones de área de siembra de Jatropha para biodiesel.....	
Cuadro 52	El Salvador: Indicadores socio-económicos y de uso de tierras.....	97
Cuadro 53	El Salvador: Uso de la tierra en 2006.....	101
Cuadro 54	El Salvador: Balance comercial total y deuda externa.....	101
Cuadro 55	El Salvador: Mayores extensiones de tierras para cosechas.....	102
Cuadro 56	El Salvador: Producción agrícola de granos y productos de exportación.....	103
Cuadro 57	El Salvador: Importaciones agrícolas.....	104
Cuadro 58	El Salvador: Consumo aparente y grado de dependencia de importaciones.....	105
Cuadro 59	El Salvador: Principales exportaciones agropecuarias, 2004.....	106
Cuadro 60	El Salvador: Importaciones de aceites vegetales.....	107
Cuadro 61	El Salvador: Producción de oleaginosas con potencial de producción de aceites.....	108
Cuadro 62	El Salvador: Indicadores energéticos.....	109
Cuadro 63	El Salvador: Balance de derivados de petróleo, 2005.....	109
Cuadro 64	El Salvador: Ventas totales de gasolina y diesel, 2004 - 2006.....	110
Cuadro 65	El Salvador: Precios de facturación para estaciones de servicio, 26 diciembre 2006 a 1 enero 2007.....	110
Cuadro 66	El Salvador: Estimaciones de área de siembra para biodiesel.....	114
Cuadro 67	Guatemala: Indicadores socio-económicos y de uso de tierras.....	119
Cuadro 68	Guatemala: Balance comercial total y deuda externa.....	119
Cuadro 69	Guatemala: Mayores extensiones de tierras para cosechas.....	120
Cuadro 70	Guatemala: Producción agrícola de granos y productos de exportación.....	121
Cuadro 71	Guatemala: Importaciones agrícolas.....	121
Cuadro 72	Guatemala: Consumo aparente y grado de dependencia de importaciones.....	122
Cuadro 73	Guatemala: Principales exportaciones agrícolas.....	123
Cuadro 74	Guatemala: Producción de palma africana (frutos).....	124
Cuadro 75	Guatemala: Indicadores energéticos.....	126
Cuadro 76	Guatemala: Balance de derivados de petróleo, 2005.....	126
Cuadro 77	Guatemala: Ventas totales de gasolina regular y diesel, 2004 – 2006.....	127
Cuadro 78	Guatemala: Precios al consumidor de gasolinas y diesel.....	127
Cuadro 79	Guatemala: Estimaciones de área de siembra para biodiesel.....	133
Cuadro 80	Indicadores socio-económicos y de uso de tierras.....	138
Cuadro 81	Balance comercial total y deuda externa.....	138
Cuadro 82	Mayores extensiones de tierras para cosechas.....	139
Cuadro 83	Producción agrícola de granos y productos de exportación.....	140
Cuadro 84	Importaciones agrícolas de Honduras.....	140
Cuadro 85	Consumo aparente y grado de dependencia de importaciones.....	141
Cuadro 86	Principales exportaciones agropecuarias.....	142
Cuadro 87	Producción de palma africana (frutos) y aceite de palma.....	143
Cuadro 88	Nombre y capacidad de las plantas de aceite de palma.....	144
Cuadro 89	Indicadores energéticos de Honduras.....	145
Cuadro 90	Consumo de combustibles.....	146
Cuadro 91	Importaciones de hidrocarburos.....	147
Cuadro 92	Ventas totales de gasolina y diesel en 2006.....	147
Cuadro 93	Capacidad de almacenamiento de hidrocarburos.....	150

Cuadro 94	Flota de vehículos en Honduras .....	150
Cuadro 95	Evaluación del Megaproyecto de biodiesel de palma .....	153
Cuadro 96	Estimaciones de área de siembra para biodiesel.....	155
Cuadro 97	Jerarquía de mercados segmentados.....	161
Cuadro 98	Propiedades promedias de diesel y biodiesel .....	16

### Gráficos:

Gráfico 1	Composición de diferentes materias primas.....	19
Gráfico 2	Evolución de precios – aceites de alto valor .....	62
Gráfico 3	Evolución de precios – aceites de valor intermedio.....	62
Gráfico 4	Evolución de precios – aceites usados y grasa animal .....	63
Gráfico 5	Reducción de costo del biodiesel por venta de glicerina .....	70
Gráfico 6	Influencia del costo del aceite sobre la viabilidad del biodiesel .....	74
Gráfico 7	Influencia de costos agrícolas sobre la viabilidad del biodiesel.....	74
Gráfico 8	Precios de aceite de colza y de biodiesel en Alemania .....	76
Gráfico 9	Precios de diesel y de biodiesel en Alemania.....	76
Gráfico 10	Precios de diesel y biodiesel en Alemania – 2006 .....	78
Gráfico 11	Costo y precios de biodiesel de palma y precios del petróleo.....	80
Gráfico 12	Costa Rica: Importancia relativa de las exportaciones agrícolas en ingresos ..	87
Gráfico 13	Costa Rica: Estimaciones de costos y viabilidad .....	98
Gráfico 14	Costa Rica: Viabilidad para la Jatropha (piñón).....	99
Gráfico 15	El Salvador: Costos y precios para biodiesel de tempate .....	115
Gráfico 16	El Salvador: Costos y precios para biodiesel de higüerillo .....	115
Gráfico 17	El Salvador: Costos y precios para biodiesel de palma.....	117
Gráfico 18	Guatemala: Edad del parque vehicular.....	128
Gráfico 19	Guatemala: Estimaciones de costos para biodiesel de palma – costos agrícolas.....	134
Gráfico 20	Guatemala: Estimaciones de costos para biodiesel de palma – precio de aceite.....	134
Gráfico 21	Guatemala: Estimaciones de costos para biodiesel de tempate – precio de aceite.....	135
Gráfico 22	Evolución de precios al consumidor – Gasolina Súper: 2004-2006 .....	148
Gráfico 23	Evolución de precios al consumidor – Gasolina reg.: 2004-2006.....	148
Gráfico 24	Evolución de precios al consumidor – Diesel: 2004-2006.....	149
Gráfico 25	Costos y precios: biodiesel de palma en Honduras .....	156
Gráfico 26	Costos y precios: biodiesel de aceite de palma en Honduras .....	157
Gráfico 27	Viabilidad para la Jatropha (tempate).....	158
Gráfico 28	Reducción de emisión de contaminantes. Base: biodiesel .....	164

### Figuras

Figura 1	Representación esquemática de un triglicérido .....	5
Figura 2	Esquema de tres moléculas de biodiesel .....	11
Figura 3	Esquema de una molécula típica de diesel .....	11
Figura 4	Opciones técnicas para sustitución del diesel por aceites vegetales.....	13

Figura 5	La cadena productiva de biodiesel .....	23
Figura 6	Proceso de producción de biodiesel .....	25
Figura 7	Esquema de la reacción de transesterificación .....	26
Figura 8	El proceso Lurgi de producción continuada .....	28
Figura 9	El proceso Axens .....	29
Figura 10	Competencia entre usos alimentarios y no alimenticios.....	57
Figura 11	Guatemala: Mapa de áreas potenciales para el cultivo de la <i>Jatropha curcas</i> ..	125

## **INTRODUCCIÓN**

El interés de países de América Central en introducir biocombustibles en sus matrices energéticas quedó patente en la Primera Reunión del Grupo Mesoamericano de Biocombustibles, llevado a cabo el 25 de agosto de 2006, en la ciudad de San José, Costa Rica, cuando los delegados de los países aprobaron el Plan de Introducción de los Biocombustibles en Centroamérica. Desde el punto de vista de sustitución de los hidrocarburos usados en transporte, el alcohol de caña de azúcar y el biodiesel son los principales biocombustibles. Este informe está centrado en analizar las perspectivas de introducción del biodiesel en las matrices energéticas de algunos países de la región.

El biodiesel posee diversas características favorables como sustituto del diesel de origen fósil: está prácticamente exento de azufre, es biodegradable, mejora la lubricidad del diesel en mezclas, reduce las emisiones de la combustión (excepto los óxidos de nitrógeno), posee mayor número de cetano que el diesel y es de origen renovable. Por todo esto, es uno de los biocombustibles que mejor se adecuan a los motores de encendido por compresión (motores diesel).

En esta parte se presentan los objetivos del informe, la delimitación de los temas tratados, la metodología de trabajo, y se describe la estructura del Informe.

### **1. Objetivos**

El objetivo principal de este informe es evaluar las condiciones favorables y las barreras a la introducción del biodiesel en la matriz energética de los países estudiados. Para esto, se definieron los siguientes objetivos parciales: a) realizar un análisis sobre las perspectivas de programas de producción y consumo de biodiesel en cuatro países de América Central (Costa Rica, El Salvador, Guatemala y Honduras); b) presentar las principales características técnicas del producto, incluyendo su desempeño ambiental; c) presentar los procesos de producción de biodiesel, con sus ventajas y desventajas; d) evaluar en cada país las condiciones locales de producción de materias primas y de aceites vegetales, considerando los volúmenes y precios actuales; e) comparar los costos de producción del biodiesel con respecto a los precios internacionales del diesel; y f) hacer recomendaciones de soporte para toma de decisiones con respecto a la introducción sostenible del biodiesel en la matriz energética, con base en la realidad de cada país.

### **2. Delimitación de los temas tratados**

Este documento presenta evaluaciones de las condiciones técnicas y económicas para la producción del biodiesel que favorezcan o dificulten su introducción en las matrices energéticas. Se presentan análisis y recomendaciones con el fin de evaluar el uso del biodiesel y ayudar en la toma de decisiones. Las condiciones generales para definir la viabilidad de la introducción del biodiesel serán discutidas, pero las cuestiones económicas locales sólo serán tratadas en la



medida de la disponibilidad de información, y no se hará un análisis detallado de proyectos específicos, sino un análisis panorámico para cada país.

### **3. Metodología**

Para poder cumplir los objetivos delineados y circunscritos en la delimitación de temas abordados, se definió una metodología constituida por aspectos cualitativos y cuantitativos.

Desde el punto de vista cuantitativo, este informe requirió la organización de información general sobre el biodiesel, su producción, opciones de materias primas, y sus características de desarrollo sostenible (social y ambiental).

El trabajo requirió la recolección de datos e información objetiva de cada país analizado sobre sus mercados de hidrocarburos, la logística de distribución de combustibles, la capacidad de producción de materias primas y de aceites vegetales, la disponibilidad de tierras para cultivar variedades destinadas a producir biodiesel y los marcos legales para los mercados de hidrocarburos, de biocombustibles y de productos agrícolas o agro-industriales. Con esos datos e información, se establecieron escenarios con proyecciones de volúmenes necesarios de biodiesel para diversos grados de penetración en el mercado de hidrocarburos, estimaciones de costos de producción y comparaciones con los precios internacionales del biodiesel.

Además de la información objetiva, se requirió realizar entrevistas con los principales actores implicados para recabar sus impresiones y expectativas acerca del uso del biodiesel. Se buscó conocer las diversas visiones del sector de gobierno, del mercado de hidrocarburos, de la industria de aceites vegetales y del sector agrícola.

Para cumplir el programa arriba descrito, se elaboró un cuestionario preliminar (Anexo I), enviado con días de anticipación a los interlocutores, con el propósito de orientar la recolección de datos e información básica para cada uno de los países a visitar. La disponibilidad anticipada de la información serviría para facilitar las entrevistas previstas.

Para conocer la realidad de cada país y realizar las entrevistas con los actores públicos y privados del mercado de combustibles, se realizó una misión de 15 días a Costa Rica, El Salvador, Guatemala y Honduras. Las reuniones, fechas, duración, lista de asistentes y temas abordados están registradas en el “Informe de la Misión en Centroamérica” (Anexo II). La información recogida, fue consolidada, analizada, evaluada y organizada en este informe.

### **4. Estructura del Informe**

Este informe presenta en el capítulo I las características técnicas generales del biodiesel y de las oleaginosas: definición, características de las oleaginosas, materias primas adecuadas para biodiesel, procesos de producción, subproductos y características ambientales.

La experiencia internacional con biodiesel se presenta en el capítulo II. Los casos de Alemania, Francia, Estados Unidos, India, China y Brasil son los más detallados. El análisis de costos, precios y condicionantes económicos se presentan en el capítulo III.

El capítulo IV muestra las perspectivas para Costa Rica. Se analizan las condiciones de infraestructura y de mercado de hidrocarburos, con detalle en el diesel. Se verifican las características agrícolas de producción de aceites vegetales, semillas u otras materias primas adecuadas para la obtención del biodiesel. Se discuten los aspectos institucionales y de regulación del país. Se exploran y evalúan escenarios asociados a la introducción del biodiesel, y se efectúan comparaciones entre los costos probables del biodiesel y los precios del diesel en Costa Rica. Finalmente, se presentan recomendaciones específicas para Costa Rica.

En los capítulos V, VI y VII se presentan las evaluaciones para El Salvador, Guatemala y Honduras, con la misma estructura descrita para Costa Rica.

El capítulo VIII presenta recomendaciones de carácter general asociadas a la introducción del biodiesel y las conclusiones.



## I. EL BIODIESEL Y SUS CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

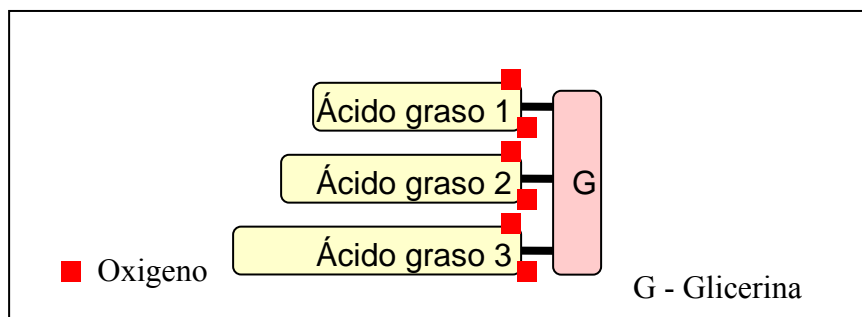
El concepto técnico del biodiesel y su proceso de producción presupone el conocimiento de algunos conceptos de la química orgánica. El biodiesel es producido a partir de aceites y grasas vegetales o grasas de origen animal y, por lo tanto, es necesario conocer esas grasas desde el punto de vista químico. De forma general, se emplea la palabra aceite para los líquidos y grasas o gorduras para las que son sólidas en condiciones ambientales, aunque sean químicamente similares.

Los aceites, grasas y gorduras que constituyen materias primas posibles para la producción del biodiesel son los llamados aceites fijos o triglicéridos y son de la clase de los lípidos (gorduras). No todos los aceites son adecuados para producción de biodiesel: los llamados aceites esenciales constituyen una familia de productos volátiles que no se prestan como materias primas para biodiesel, pertenecen a otras familias químicas (de los terpenos, fenoles y otras sustancias aromáticas) y poseen muy alto valor económico por sus propiedades aromáticas. Ejemplos son el aceite de la cáscara de naranja y el aceite de pino.

Los triglicéridos son ésteres de ácidos grasos. En el Anexo III se presentan las estructuras químicas de la glicerina, de los ésteres, de los ácidos grasos, de los triglicéridos y del biodiesel. De forma gráfica, esquemática y sin pretensiones de mantener el rigor científico, si puede representar los triglicéridos como en la Figura 1.

Figura 1

### REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE UN TRIGLICÉRIDO



El aceite de cada especie vegetal posee una combinación de diferentes triglicéridos, que son moléculas grandes, compuestas por esterificación de tres ácidos grasos, los cuales pueden ser iguales o distintos. En el anexo III también se muestran las estructuras de los principales ácidos grasos presentes en los aceites y grasas, así como su participación porcentual en diversos aceites vegetales y grasas animales.

## 1. Producción mundial de aceites vegetales y su productividad

El mercado de oleaginosas presenta tendencia creciente desde hace muchos años. El cuadro 1 muestra la serie histórica de producción de las principales especies oleaginosas empleadas en la producción de aceite, clasificadas entre cultivos perennes anuales. Como se puede ver, la productividad también crece de manera consistente, al igual que la producción per cápita, es decir, el crecimiento de la producción de oleaginosas es mayor que el crecimiento de la población.

Cuadro 1

### PRODUCCIÓN MUNDIAL DE OLEAGINOSAS Perennes: palma, copra y olivera. Anuales: soja, colza, girasol y algodón

Año	Prod. Total (1000 ton.)		Prod. / capita		Área de cosecha (1000 ha)		Productividad (ton./ha)	
	Perenne	Anual	Perenne	Anual	Perenne	Anual	Perenne	Anual
1965	47015	83930	14	25	12116	72855	3,88	1,15
1970	48994	95888	13	26	13344	80634	3,67	1,19
1975	61603	118918	15	29	14951	90416	4,12	1,32
1980	73309	146667	16	33	18175	108394	4,03	1,35
1985	88976	189910	18	39	21469	116090	4,14	1,64
1990	112236	209856	21	40	23528	124933	4,77	1,68
1995	147424	244092	26	43	26321	142775	5,60	1,71
2000	188123	280414	31	46	28855	153249	6,52	1,83
2005	242811	352201	38	55	30881	177071	7,86	1,99

Fuente: Faostat, 2005.

El cuadro 2 presenta la producción de aceites y grasas por producto. La producción de aceite de palma viene creciendo y actualmente ya es el aceite más producido en el mundo.

Cuadro 2

### PRODUCCIÓN MUNDIAL DE ACEITES Y GRASAS (Miles de toneladas)

Aceite	2001	2002	2003	2004	2005
Aceite de soya	27829	29856	31284	30730	33540
Aceite de palma	23999	25424	27920	30920	33610
Aceite de colza	13723	13286	12548	14910	16040
Aceite de girasol	8191	7608	8915	9410	9730
Sebo y grasas animales	7693	8073	8029	8108	8186
Aceite de maní	5139	5162	4526	4750	4510
Aceite de algodón	4051	4233	3964	4410	5020
Aceite de palm kernel	2941	3033	3314	3580	3960
Aceite de coco	3511	3155	3295	3070	3250
Aceite de oliva	2761	2718	2903	2978	2730
Aceite de maíz	1962	2016	2015	2015	2055
Otros aceites y grasas	15826	16000	16667	16267	15569

Fuente: Oil World Monthlies 2006 y Oil World Annual 2005.

Son muchas las especies vegetales que pueden producir aceites o grasas. El cuadro 3 muestra, para algunas oleaginosas, los nombres de la especie (español, inglés y científico), su productividad agrícola (t oleaginosa / ha) y su productividad en aceite (litros de aceite / ha). Se debe recordar que estas cifras de productividad constituyen un rango de valores, donde los números menores o promedios están más cercanos de la realidad y los mayores representan límites máximos superiores, metas alcanzables en casos muy especiales. Los valores de productividad específicos para un dado lugar, siempre que estén disponibles, deben prevalecer sobre los valores indicados en este cuadro, debido a las diferentes condiciones locales de producción así como a los tipos de suelo y clima.

Muchas especies de oleaginosas no son empleadas para la producción de aceite y son usadas exclusivamente para la alimentación. El alto valor de estas oleaginosas en granos vuelve poco económica la extracción del aceite; como es el caso de varios tipos de semillas, como las nueces, las avellanas, el pistacho, la macadamia, el marañón, etc. En algunos casos, el aceite producido tiene también alto valor para fines farmacéuticos o cosméticos, como ocurre con el aceite de almendra.

Cuadro 3

## ESPECIES OLEAGINOSAS

Nombres de las oleaginosas			Prod. Agrícola	Prod. Aceite	Aceite
Español	Inglés	Científico	t / ha	Litro / ha	%
Ajonjolí	Sesame	Sesamun indicus	0,8	490-700	38-40
Girasol	Sunflower	Heliantus annus	1,5-2,0	700-1100	39-48
Higuerilla	Castor bean	Ricinos comunis	0,6-2,5	620-1200	42-45
Maní	Peanut	Arachis hipogaea	1,4-2,5	700-1000	39-48
Palma aceitera	Palm	Elaeis guineensis	10-22	3000-5900	18-26
Soya	Soybean	Glycine max	1,5-3,0	350-520	17-19
Colza/Canola	Rapessed	Brassica napus	1,7-2,0	690-1100	37-46
Algodón	Cottonseed	Gossypium hirsutum	1,7-3,0	270-450	16-18
Arroz	Rice	Oriza sativa	6,0-10	700-900	18-21
Piñón	Jatropha	Jatropha curcas	1,0-5,0	950-1680	24-26
Coco (Copra)	Coconut	Cocos nucifera	1,0-5,0	2100-2510	52-60
Maíz	Corn	Zea mais	6,0-8,0	170-200	4-8
Aguacate	Avocado	Persea americana	6,0-9,0	2200-2800	10-30
Oliva	Olive	Olea europaea	2,0-12	1200-1400	12-30

Fuente: Beare-Rogers, 2001; Macedo & Nogueira, 2005

Un aceite vegetal crudo está compuesto básicamente por triglicéridos, como se observa en el cuadro 4. Mono y di glicéridos también están presentes así como ácidos grasos libres. Otros componentes presentan participación porcentual muy baja, pero con propiedades que pueden ser muy importantes, como las vitaminas y fosfolípidos.

Cuadro 4

## COMPOSICIÓN TÍPICA DE UN ACEITE VEGETAL CRUDO

Compuesto	Porcentaje %
Triglicéridos	95
Mono y di glicéridos	0,1 – 2,0
Ácidos grasos libre (FFA)	0,3 – 2,0
Fosfolípidios	0,1 – 0,2
Vitaminas	~ 0,1
Colorantes naturales	35 ppm
Minerales (Mg, Ca, Fe)	5 – 300 ppm
Azufre (glicosideos)	5 – 50 ppm

Fuente: Knothe, 1997

Los aceites vegetales pueden ser empleados de varias maneras aunque su uso más común es para alimentación. El cuadro 5 muestra las estimaciones del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos para la división de la producción entre uso alimenticio y uso industrial. Características particulares de cada aceite, así como los hábitos de cultivo hacen con que existan diferencias locales de valoración de cada aceite. Por ejemplo, en parte de Europa el uso del aceite de oliva es casi absoluto y los demás aceites vegetales son empleados solamente para freír.

Cuadro 5

## USOS DE LOS ACEITES VEGETALES

Años	Alimentación	Usos industriales
	Millones de toneladas	Millones de toneladas
00/01	68	7
01/02	69	7
02/03	72	8
03/04	75	10
04/05	79	12
05/06	83	15
06/07	86	17

Fuente: USDA Estimates, 2006

En países donde el maíz es la base de la alimentación, como en Centroamérica y donde la producción local no posee gran excedente, no es común extraer el aceite de maíz. En parte de África, el principal aceite de cocina es el aceite de palma crudo. El aceite de soya, que hoy es el más usado en Brasil, prácticamente no era empleado hasta los años 70 en aquel país: los aceites más empleados entonces eran de algodón, de maní, de maíz.

Una característica importante de las oleaginosas es la torta que proviene de la extracción del aceite que puede ser empleada para alimentación animal. A veces, como en el caso de la soya, su contenido en proteínas es tan importante que la torta es empleada también para alimentación humana y obtiene buenos precios.

Los aceites vegetales también poseen utilidad en la industria, en la fabricación de jabones, perfumes y otros productos de cuidado personal o cosméticos. Algunos aceites son útiles como agentes de secado en tintas o en tratamiento de maderas. Otros usos industriales para aceites vegetales son el aislamiento eléctrico, los fluidos hidráulicos de uso múltiple y la fabricación de lubricantes sintéticos. Un factor que inhibe el mayor uso de aceites en la industria es que, como contrapartida de su carácter biodegradable, los aceites tienen problemas de estabilidad y se tornan rancios.

Algunos aceites vegetales, que no son comestibles o necesitan de tratamiento especial para mejorar su aceptación, son empleados en usos farmacéuticos o industriales. Este es el caso de los aceites de linaza (uso industrial), del aceite de higüerillo (uso industrial), del aceite de jojoba (uso cosmético) o del aceite de piñón (*Jatropha*) para producción de biodiesel.

Muchas especies oleaginosas no son empleadas de forma amplia hasta ahora, ya sea por características de mercado, por no ser comestibles, o por aún desconocerse sus propiedades. Para la producción del biodiesel, muchas especies que no son cultivadas merecen estudios más avanzados para evaluar su potencialidad, especialmente su productividad por hectárea y posibles usos de la torta.

En el caso de los países de Centroamérica, la única oleaginosa ya producida en grandes cantidades es la palma africana (Costa Rica, Guatemala y Honduras). El Salvador no produce granos o semillas para extracción de aceite.

Antes de avanzar en los conceptos del biodiesel, es preciso analizar qué son los motores diesel, sus peculiaridades, sus exigencias para las características de los combustibles a emplear y en qué condiciones los aceites y grasas vegetales pueden ser empleados como combustible.

## **2. Los aceites vegetales y los motores diesel**

### **a) Los motores a pistón: dos concepciones distintas**

Para entender la conexión entre los motores diesel y los aceites vegetales o sus derivados, es necesario comprender los dos principios básicos de funcionamiento de los motores a pistón (Otto o Diesel).

En 1876, Nicklaus Otto inventó un motor de combustión interna a pistón que fue el predecesor de los modernos motores a gasolina. En este tipo de motor, se introducen vapores de combustible y aire en el cilindro y la combustión empieza a través de una chispa eléctrica disparada en el momento adecuado. Si la tasa de compresión es muy alta, el aire se torna muy caliente debido a la compresión y la combustión de la mezcla aire/combustible puede ocurrir de forma prematura ocasionando muchos problemas para el motor además de perjudicar su desempeño. Este tipo de motor se llama “de encendido por chispa” o “motor Otto” y los mejores combustibles para éste son los de alta volatilidad y alto octanaje: la gasolina, el alcohol, el gas licuado de petróleo y el gas natural.



Rudolph Diesel quería construir un motor a pistón con altas tasas de compresión para obtener mejor eficiencia. Patentó su idea en 1893 y construyó su primer motor en 1897. Desde el inicio, Diesel quiso operar su motor con carbón pulverizado, pero después optó por los combustibles líquidos. En este tipo de motor, solamente se introduce aire que es comprimido en el cilindro, el combustible sólo es introducido cuando el aire ya está comprimido y muy caliente y la combustión empieza debido a la temperatura del aire sin chispas eléctricas. Por esto, este tipo de motor se llama “de encendido por compresión” o “motor diesel”. Los combustibles más adecuados para este motor son el destilado mediano de petróleo (llamado “aceite diesel” o “diesel”), aceites vegetales ‘in natura’ o modificados (biodiesel) y poseen características técnicas opuestas a los combustibles para motores Otto. Un buen combustible para el motor diesel no es adecuado al motor Otto y viceversa.

El uso de aceites vegetales en motores diesel viene desde el inicio del siglo XX. El propio Rudolph Diesel declaró que los motores de encendido por compresión podrían operar con aceites vegetales. Para la historia sobre el uso de aceites vegetales en motores diesel (véase Knothe, 2001). Los bajos precios de los hidrocarburos de petróleo durante casi todo el siglo XX inhibieron las investigaciones y uso de aceites vegetales en motores de encendido por compresión. Actualmente, no es posible el uso directo de aceites vegetales en motores diesel modernos sin una preparación especial, como se muestra a continuación.

i) ¿Aceites vegetales puros o biodiesel? Hace algunos años, se hizo una demostración por televisión: algunos litros de aceite de cocina usados eran filtrados y puestos en un tanque de combustible vacío de un coche diesel. El conductor encendía el motor y salía por la carretera. Lo que no se mostró en el programa de televisión fueron los problemas que surgen con el uso de este aceite vegetal. No se discutieron cuestiones como el arranque en frío y problemas de largo plazo para el motor, que arruinar la historia mostrada en la televisión. En principio, cualquier motor diesel puede usar un aceite vegetal como combustible en una situación de emergencia y por cortos períodos de tiempo; sin embargo, bajo estas condiciones se sacrifica el desempeño y la eficiencia, además de tener un aumento de emisiones y riesgo de reducción de durabilidad.

En los motores diesel la formación de la mezcla y la combustión ocurren con la inyección del combustible en un ambiente de aire comprimido y muy caliente. Para una buena combustión, es necesario que la distribución estadística del tamaño de las gotas de combustible sea adecuada. Esto se hace a través del sistema de inyección, con su geometría, presión y dosis determinadas para cada motor, en cada condición de operación. Para que el chorro de combustible y la combustión sean adecuados, algunas propiedades del combustible son determinantes: viscosidad, densidad, tensión superficial, número de cetano y volatilidad.

De esta forma, al cambiar un combustible por otro con propiedades muy diversas, cambiarán las condiciones para la buena combustión, y el motor perderá desempeño y/o durabilidad. La figura 1 mostró esquemáticamente un triglicérido (componente principal de los aceites vegetales o gorduras animales). Las figuras 2 y 3 muestran, con la misma forma esquemática, el biodiesel y el diesel. De forma muy sencilla y esquemática, un triglicérido puede producir tres moléculas de biodiesel (iguales o no); cada molécula de biodiesel es químicamente más próxima a una molécula típica de diesel que el triglicérido que la originó y las propiedades del biodiesel son más próximas a las propiedades del diesel.



A inicio de los años ochenta, después de la segunda crisis del petróleo, varios países intentaron sustituir el diesel por aceites vegetales. Para motores diesel equipados con inyectores mecánicos en línea y pre-cámara de combustión, los menos eficientes y que no exigió mucha precisión del inyector, se logró la sustitución del diesel, aunque operando con pérdidas de potencia y de eficiencia y con aumento de emisiones, siendo suficiente precalentar el aceite vegetal.

Para motores de inyección directa, aún no se puede obtener más de una decena de horas de operación sin fallas. Hoy, los motores equipados con pre-cámara son la excepción. La necesidad de mejores eficiencias y reducción de emisiones de contaminantes hace que los fabricantes de motores diesel empleen cada vez más los conceptos de inyección directa y control electrónico de inyección. Actualmente, pocos fabricantes producen motores de pre-cámara.

Todas las investigaciones enfocadas en el uso de aceites vegetales en motores diesel mostraron problemas similares: formación de “coke” o gomas en los inyectores, reducción de potencia y de eficiencia, depósitos de carbón, desgaste en los anillos de segmento y dilución del aceite lubricante por contaminación con aceite vegetal (Maziero, 2006). Muchos de estos efectos fueron observados aun cuando se suministraba una mezcla de 85% de diesel con 15% de aceite vegetal.

El cuadro 7 muestra los problemas que se observan en el motor cuando se emplean aceites vegetales puros. Se debe notar que las posibles soluciones a estos problemas están asociadas a modificaciones en el motor y al calentamiento del aceite, para reducir su viscosidad y tensión superficial, logrando mejor atomización.

Los problemas descritos arriba no ocurren de la misma forma para todos los motores, varían de motor a motor en grado e intensidad. En cada caso, es necesario verificar qué acciones deben ser tomadas en cuenta para que un determinado motor pueda operar con aceite vegetal como combustible. Es evidente, entonces, que no se puede emplear aceites vegetales en motores diesel sin hacer modificaciones ya sea en el aceite o en el motor. Por lo tanto, se presentan dos alternativas técnicas viables, como se indica en la figura 4.

La opción más común es hacer la modificación del aceite vegetal para condiciones más similares al diesel de petróleo para así poder emplear el combustible en todos los vehículos en uso, sin ninguna alteración en los motores o en el sistema de combustible del vehículo.

Muchos sectores plantean el uso de los aceites vegetales puros (SVO – Straight Vegetable Oil, o PPO – Pure Plant Oil) o en mezcla con diesel con el objeto de reducir costos. En estos casos, el motor debe ser especialmente preparado para recibir la mezcla, para que su durabilidad no sea afectada. En Alemania, la empresa (Elsbett) intentó hacer un motor específico para el aceite vegetal, pero no logró éxito comercial. La propuesta del biodiesel es opuesta: modificar químicamente el aceite vegetal de forma que sus propiedades sean más próximas a las del diesel de petróleo y usar el biodiesel sin ninguna alteración en el motor.

Cuadro 7

## PROBLEMAS EN EL MOTOR DIESEL CON USO DE ACEITES VEGETALES

Problema	Causas probables	Solución potencial
<b>Corto plazo:</b>		
Arranque a frío	Alta viscosidad del aceite Bajo número de cetano Bajo punto de enturbamiento	Previo a la inyección, calentar el combustible
Obstrucción de filtros, tuberías e inyectores	Gomas naturales y cenizas presentes en el aceite	Emplear aceite desgomado Filtrar el aceite a 4 micrones
Detonación	Bajo número de cetano Inyección fuera de tiempo	Cambiar el punto de inyección. Calentar el aceite
<b>Largo plazo:</b>		
Formación de coque en los inyectores y pistón	Alta viscosidad Combustión incompleta Cargas parciales	Calentar el aceite Cambiar p/ diesel en cargas bajas
Depósitos de carbón en el pistón y culata del motor	Alta viscosidad Combustión incompleta Cargas bajas	Calentar el aceite Cambiar p/ diesel en cargas bajas
Desgaste excesivo del motor	Alta viscosidad Combustión incompleta Ácidos grasos libres (FFA) Dilución del lubricante	Calentar el aceite Cambiar p/ diesel en cargas bajas Usar aditivos p/ lubricante
Fallas en la lubricación	Polimerización de poli-insaturados Ácidos grasos libres (FFA)	Calentar el aceite Cambiar p/ diesel en cargas bajas Usar aditivos p/ lubricante

Fuente: Ma & Hanna, 1999

Figura 4

## OPCIONES TÉCNICAS PARA SUSTITUCIÓN DEL DIESEL POR ACEITES VEGETALES

**Mantener el aceite vegetal sin modificación => modificar el motor**

*VERSUS*

**Modificar el aceite vegetal (biodiesel) => motor sin alteraciones**

En la Unión Europea, el uso del aceite vegetal puro como biocombustible está previsto en la Directiva 2003/30/EC (European Parliament, 2003), que promueve el uso de biocombustibles. A partir que el aceite vegetal sea aceptable para el motor a que se destina y que las emisiones de gases contaminantes estén dentro de los límites para el uso específico, el aceite vegetal se considera como biocombustible en los marcos legales de la Unión Europea.

En Alemania existen algunas oficinas (Elsbett & Bialkowsky, 2003) que hacen las adaptaciones para que los motores puedan aceptar aceites vegetales, y se estima que alrededor de 5.000 vehículos estén operando con aceites vegetales. Los costos para adecuar el motor al consumo de aceite vegetal varían entre € 1.200 y € 6.000 (US\$ 1.700 y US\$ 7.500), de acuerdo a

las necesidades de cada motor. En los casos más sencillos, se hace el calentamiento del aceite vegetal hasta que su viscosidad permita la atomización en el motor. El diesel es usado para el arranque y calentamiento del motor y después se cambia al aceite vegetal. Cuando son pequeñas alteraciones, el motor puede volver a operar con diesel; cuando las modificaciones son mayores, incluyendo nueva calibración del sistema de suministro de combustible y cambio de los inyectores, el motor no podrá ser operado con diesel, excepto como emergencia. Es importante resaltar que las modificaciones del motor serán válidas solamente para un aceite vegetal dato y este deberá tener propiedades y calidad controladas.

En Alemania, se estableció un patrón de calidad para el aceite de colza (rapeseed) para su uso directo en vehículos (RK-Qualitätsstandard, 2000). Otros países de la Unión Europea adoptan el patrón de Alemania, que se aplica sólo para el aceite de colza. No existe un sistema de distribución para aceite vegetal combustible ya que las adquisiciones dependen de otro tipo de logística y no de la cadena de distribución de hidrocarburos.

Si todo el aceite de colza producido en rotación de producción (ver la descripción adelante) fuera empleado como combustible, solamente se cubriría un 9% del total de la energía usada en la Unión Europea para transportes. Es decir, en un escenario optimista, el aceite de colza respondería a una pequeña parte de la demanda para transportes.

Desde el punto de vista ambiental, existen pocos estudios sobre las emisiones de motores que operan con aceites vegetales. Datos preliminares indican que las emisiones de CO e hidrocarburos no quemados son menores, con aumento de emisiones de NOx y de partículas finas. Las emisiones de CO2 de origen fósil, son muy bajas. En los Estados Unidos la conversión de un vehículo para el uso de aceite vegetal no es legal por no atender las determinaciones de la US Environmental Protection Agency (EPA).

Como existen muchos obstáculos estructurales (garantizar la calidad del aceite, necesidad de modificar motores, necesidad de nueva estructura de distribución, etc.) es difícil imaginar que el uso de aceite vegetal en motores crezca mucho. Un nicho de mercado puede ser el sector agrícola, donde el aceite vegetal puede ser obtenido a mejores precios. El combustible es parte de los costos agrícolas (exento del VAT) y existen tanques locales (independencia de sistema de distribución). Soluciones locales pueden ser viables. Los precios de aceite de colza para combustible (exento de impuestos) son hasta 25% más bajos que el diesel de petróleo en Alemania.

Como la solución que permite mayor facilidad para la comercialización es la transformación del aceite vegetal en biodiesel por permitir su empleo en toda la flota diesel existente sin restricciones, esta solución ganó mayor aceptación. Por lo mismo, al igual que por su viabilidad técnica el uso de aceites vegetales puros no encuentra gran penetración y tiende a mantenerse restringido a pocos usos.

### **3. El biodiesel: definición y características técnicas**

#### **a) Definición de biodiesel**

El nombre “biodiesel” es aplicado a combustibles que se prestan a sustituir total o parcialmente el diesel de petróleo, en particular en el empleo en motores a pistón de encendido

por compresión (los llamados “motores diesel”). El prefijo “bio” se usa para caracterizar el origen biológico del producto, obtenidos de aceites vegetales o grasas animales. La palabra “biodiesel” se difundió por todo el mundo, aunque no siempre ganó la misma aceptación. Existe, por tanto, controversia en la definición de “biodiesel”. Esto queda muy claro en el *Internet* cuando las personas llaman “biodiesel” a cualquier combustible para motores diesel que sea originado de vegetales o animales, como el aceite usado para freír, sin cualquier tratamiento (como ejemplo, véase Aziz y otros, 2005).

Las definiciones de “biodiesel” que poseen mayor consistencia técnica son aquellas que caracterizan su composición química (mono-alquil ésteres de ácidos grasos), su origen (vegetal o animal), su empleo (motores diesel) y sus características técnicas (especificaciones).

Biodiesel es definido por el World Customs Organizations (WCO) como “una mezcla de mono-alquil ésteres de ácidos grasos de cadena carbónica larga (16-18 carbonos) derivado de aceites vegetales o grasas animales, que constituye un combustible domestico renovable para motores diesel y que cumple las especificaciones ASTM D 6751.”

En el 2003, el Congreso de Estados Unidos propuso para fines de tasación, la definición siguiente: “El término “biodiesel” significa mono-alquil ésteres de ácidos grasos de cadena carbónica larga derivado de material vegetal o animal que obedezca (A) los requisitos de registro para combustibles y aditivos para combustibles establecidos por la Environmental Protection Agency bajo la sección 211 del Clean Air Act (42 U.S.C. 7545), y (B) los requisitos de la American Society of Testing and Materials D6751”.

En la Unión Europea, el uso de biocombustibles para transportes recibe atención y su promoción fue motivo de una Directiva del Parlamento Europeo (Directive 2003/30/EC). En esta Directiva, válida para todos los Estados miembros, la definición de biodiesel es: “metil-ésteres producidos de aceites vegetales o animales, con calidad de diesel, para ser usado como biocombustible.”

En Brasil, la definición legal del biodiesel aún no posee consistencia técnica: el biodiesel es definido a partir de su origen (aceites o grasas) y de su empleo (sustituto del diesel de petróleo), sin hacer mención al proceso de producción ni a su composición química (Ley 11.097, de 13 de enero de 2005): “Biodiesel: biocombustible derivado de biomasa renovable para uso en motores de combustión interna con encendido por compresión o conforme reglamento, para generación de otro tipo de energía, que pueda sustituir parcial o totalmente combustibles de origen fósil”. De este modo, diversos productos pueden ser llamados de “biodiesel” desde el punto de vista de la Ley: los alquil-ésteres de aceites grasos, los productos del *cracking* térmico o catalítico de aceites y grasas y los aceites vegetales “in natura”. Cualquier producto de origen renovable que pueda ser empleado en sustitución al diesel de petróleo puede, en principio, llamarse “biodiesel”.

Esta característica legal muy amplia es perjudicial para la definición de las especificaciones técnicas del biodiesel. La Agencia Nacional de Petróleo, Gas Natural e Biocombustibles (ANP) es el órgano de gobierno encargado de establecer las especificaciones técnicas de los combustibles derivados de petróleo y biocombustibles. Por suerte, la especificación del biodiesel (Portaria ANP N.240/2003) se encontraba en vigor antes que fuera

aprobada la Ley 11.097, por lo que las características técnicas se aplican a mono-alquil ésteres de ácidos grasos. No es posible establecer especificaciones que incluyan todas las posibilidades técnicas que están bajo una definición legal tan amplia de “biodiesel” como la adoptada en Brasil.

#### **b) Los mono-alquil ésteres de ácidos grasos – características**

El biodiesel es una mezcla de mono-alquil ésteres, cuya composición depende de la materia prima empleada, es decir, de la proporción de cada tipo de ácido graso en el aceite o grasa empleada. En la figura 2 se mostró un esquema de las moléculas típicas del biodiesel (mono-alquil ésteres). Para mayores detalles químicos sobre los ácidos grasos y los alquil-ésteres derivados de ellos, véase el Anexo III.

El biodiesel puede ser empleado puro o en mezclas con el diesel de petróleo. Las mezclas son denominadas BXX, donde XX es el porcentaje de biodiesel en la mezcla. Así, B2 contiene 2% de biodiesel en diesel, B20 contiene 20% de biodiesel y B100 es el biodiesel puro.

Durante el siglo XX, se intentó emplear los aceites vegetales puros en motores en varias ocasiones, pero con los problemas ya relatados. Entonces, se intentaron realizar varias modificaciones químicas de los aceites vegetales con el objeto de de forma a tornarlos más aceptables a los motores diesel.

Mensier (1952) fue uno de los precursores del uso de ésteres metílicos de ácidos grasos para sustituir el diesel. En sus estudios, trabajó con aceite de palma y metanol como materias primas para el proceso de transesterificación de los triglicéridos del aceite. El producto obtenido (ésteres puros, conocidos como B100), que hoy se llama biodiesel, fue probado en varios motores diesel sin presentar los problemas típicos del uso de aceites vegetales puros (SVO). En sus mediciones, el consumo del motor operando con la mezcla de ésteres creció en un 5,3% (en masa) y 3,2% (en volumen) con relación al consumo de base (diesel), valores compatibles con las características técnicas de los ésteres y del diesel.

Para mayores detalles acerca del manejo y uso del biodiesel, se recomienda el texto del US Department of Energy (2006), que contiene mucha información sobre el B100 y el B20.

Las ventajas del uso de biodiesel son ya conocidas y bien divulgadas. Las características descritas abajo pertenecen al B100; para mezclas, las ventajas (y desventajas) son menores cuanto menor es el porcentaje de biodiesel en la mezcla con diesel de petróleo:

- El biodiesel es un recurso renovable, biodegradable y no tóxico.
- Por ser renovable, parte del dióxido de carbón emitido en la combustión no contribuye al efecto invernadero.
- Es oxigenado, lo que hace que produzca menores emisiones de monóxido de carbón, de hidrocarburos no quemados y de partículas de humo. Esto contribuye a la reducción de la contaminación del aire de las ciudades.
- Requiere pocas o ninguna alteración en el motor.
- Posee número de cetano alto y excelente lubricidad (véase adelante).
- El manejo es más seguro, pues posee *flash point* (punto de inflamación) muy alto.

- Puede contribuir a reducir la dependencia de combustible fósil del país.
- Puede contribuir al desarrollo rural e industrial.
- Puede generar oportunidades de empleo, especialmente en la agricultura.
- Puede contribuir a la reducción de importaciones de diesel.
- Puede ser elegible para proyectos de créditos de carbón.

Su empleo también posee algunas desventajas, que deben ser conocidas y consideradas para su utilización correcta:

- El biodiesel posee alrededor de 8% menos energía por litro que el diesel. La potencia y el consumo del motor serán afectados en general, negativamente.
- El biodiesel produce emisiones de NOx mayores que las producidas por el diesel. Desde el punto de vista de contaminación ambiental, ésta es su única desventaja.
- El biodiesel es un buen solvente, por lo que puede disolver sedimentos presentes en el sistema de combustible del motor y causar obstrucción de filtros en su primer uso en motores que operan con diesel. Se recomienda hacer una limpieza de todo el sistema de combustible al cambiar de diesel a biodiesel.
- El biodiesel se oxida con más rapidez que el diesel, característica que puede ser un problema para el almacenamiento a largo plazo para este producto. El biodiesel viejo se vuelve ácido y forma sedimentos saliendo de los estándares de calidad.
- El biodiesel no tiene buenas propiedades para condiciones de temperatura ambiente baja (punto de enturbamiento, punto de obstrucción de filtros, punto de escurrimiento (véase adelante). Este es un problema para países donde con frecuencia se observan temperaturas ambientes debajo de 10°C. A bajas temperaturas, el biodiesel empieza a solidificar y puede obstruir los filtros, parando el motor o sin encender la ignición de partida.
- El producto no es compatible con algunos materiales, en especial algunos compuestos de caucho usados en conductos y sellos.
- El biodiesel no es compatible con algunos tipos de materiales plásticos y con el cobre y sus aleaciones (bronce, etc.), plomo y zinc.
- El biodiesel puede causar obstrucción de filtros a temperaturas mayores, en caso de presencia de contaminantes (agua y sales alcalinas) o por polimerización por oxidación. El biodiesel producido con calidad, almacenado con cuidado y que no esté viejo, no presenta estos problemas.

Las características y propiedades de un biodiesel en particular serán determinadas por el porcentaje de cada ácido graso presente en el aceite o grasa de donde fue producido. El Cuadro 8 muestra algunas propiedades de los ácidos grasos encontrados más frecuentemente en los aceites vegetales. La nomenclatura del acrónimo indica el tamaño de la cadena de carbón y la existencia de enlaces dobles: C18:1 indica que la cadena carbónica es de 18 átomos de carbón y existe un enlace doble en la cadena. Los enlaces dobles caracterizan el grado de saturación del ácido: los saturados no poseen enlaces dobles de carbón; los insaturados poseen un enlace doble y los poli-insaturados poseen dos o más enlaces dobles. Como se observa en el cuadro 8, el punto de fusión crece con el tamaño de la cadena de átomos de carbón y, para un mismo número de átomos de carbón, con la saturación. Los poli-insaturados poseen los más bajos puntos de fusión. De modo general, el número de cetano, el calor de combustión, el punto de fusión y la viscosidad aumentan con el tamaño de la cadena carbónica y disminuyen con el aumento de la insaturación.



Cuadro 8

## ALGUNAS PROPIEDADES DE ÁCIDOS GRASOS

Ácido graso	Acrónimo	Masa molecular	Punto de fusión °C	Punto de Ebullición °C	Número Cetano	Calor de combustión Kcal/mol
Caprílico	C8:0	144,22	16,5	239,3	--	--
Cáprico	C10:0	172,27	31,5	270,0	47,6	1 453,07
Láurico	C12:0	200,32	44,0	231,0	--	1 763,25
Mirístico	C14:0	228,38	58,0	250,5	--	2 073,91
Palmítico	C16:0	266,43	63,0	350,0	--	2 384,76
Esteárico	C18:0	284,48	71,0	360,0	--	2 696,12
Oléico	C18:1	282,47	16,0	286,0	--	2 657,4
Linoléico	C18:2	280,45	-6,0	230,0	--	--
Linolênico	C18:3	278,44	-11,0	232,0	--	--
Erúcico	C22:1	338,58	33,0	265,0	--	--

Fuente: Briggs y otros, 2005.

Cuadro 9

## PROPIEDADES DE MONO-ALQUIL ÉSTERES PUROS

Éster de ácido	Masa molecular	Punto de fusión °C	Punto de Ebullición °C	Número Cetano	Calor de combustión Kcal/mol
Metil-Caprilato	158,24	--	193,0	33,6	1313,00
Metil-Cáprato	186,30	--	224,0	47,7	1625,00
Metil-Láurato	214,35	5,0	266,0	61,4	1940,00
Metil-Miristato	242,41	18,5	295,0	66,2	2254,00
Metil-Palmitato	270,46	30,5	418,0	74,5	2550,00
Metil-Esteárate	298,51	39,1	443,0	86,9	2859,00
Metil-Oleato	296,49	-20,0	218,5	47,2	2828,00
Metil-Linoleato	294,48	-35,0	215,0	28,5	2794,00
Metil-Linolenato	292,46	-57,0	109,0	20,6	2760,00
Metil-Erúcato	352,60	--	222,0	76,0	3454,00

Fuente: Briggs et al, 2005

El Cuadro 9 muestra algunas propiedades de cada tipo de mono-alkil éster, que pueden ser comparadas con aquellas de los ácidos grasos que les dieron origen. Se debe notar que algunos de estos ésteres poseen un punto de fusión muy alto —el origen del problema del uso de B100 a bajas temperaturas ambientes.

Las propiedades de cada biodiesel serán determinadas por el porcentaje de cada éster presente en la mezcla. Por ejemplo, una determinada muestra de biodiesel de soya posee la siguiente composición de ácidos grasos: 11,3% de metil palmitato (C16:0), 3,5% de metil estearato (C18:0), 22,5% de metil oleato (C18:1), 54,6% de metil linoleato (C18:2) y 8,1% de metil linolenato (C18:3). Entonces, las propiedades de este biodiesel serán la combinación de las propiedades de cada uno de sus ésteres componentes.

Para evaluar como varían las propiedades del biodiesel de diversas materias primas, es interesante usar el criterio de saturación de las cadenas de ácidos grasos. El cuadro 10 indica, de modo cualitativo, como la saturación afecta tres propiedades importantes: el número de cetano, el punto de enturbamiento y la estabilidad a oxidación. El biodiesel producido por ácidos grasos saturados posee mayor número de cetano y estabilidad que los insaturados, pero es difícil de emplear en bajas temperaturas (alto punto de enturbamiento).

Cuadro 10

## PROPIEDADES DEL BODIESEL EN FUNCIÓN DE SU COMPOSICIÓN

	Saturados	Mono-Insaturados	Poli-insaturados
Ácido graso	C12:0 a C22:0	C16:1 a C22:1	C18:2; C18:3
Número de cetano	Alto	Medio	Bajo
Punto de enturbamiento	Alto	Medio	Bajo
Estabilidad	Alto	Medio	Bajo

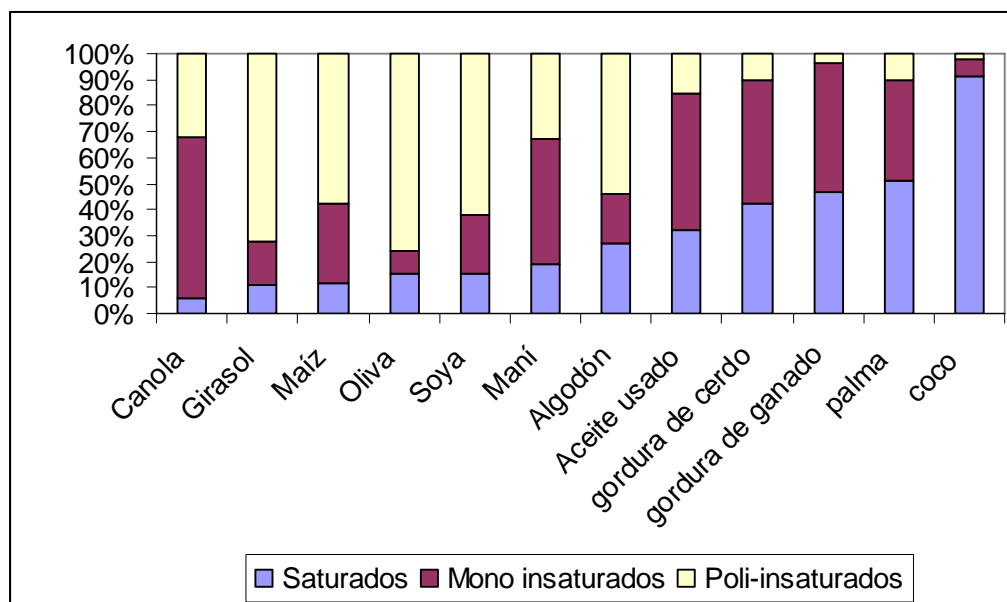
Fuente: USDOE, 2006

El gráfico 1 adaptado también de USDOE (2006), presenta las composiciones típicas de ácidos saturados, mono-insaturados y poli-insaturados para diferentes oleaginosas y grasas animales.

Tomando en cuenta la información del gráfico 1, es posible prever el comportamiento del biodiesel producido de cada materia prima; por ejemplo, los biodieseles producidos de coco o de palma tendrán los mayores números de cetano y la mayor estabilidad, pero serán de empleo muy difícil en bajas temperaturas. Por otro lado, el biodiesel producido de girasol tendrá menor número de cetano y menor estabilidad, pero tendrá mejores propiedades para uso en bajas temperaturas.

Gráfico 1

## COMPOSICIÓN DE DIFERENTES MATERIAS PRIMAS



Fuente: USDOE 2006, biodiesel.

### c) **La calidad del biodiesel**

Es muy importante fijar estándares de calidad para el biodiesel, teniendo en cuenta que, como se ha mostrado arriba, las propiedades del biodiesel varían de acuerdo con su origen (materia prima). Además, como se mostrará más adelante, en el proceso de fabricación del biodiesel se pueden formar contaminantes en el producto final que deben ser eliminados para que el biodiesel producido tenga las características adecuadas a su uso en motores diesel. Esta es la razón principal por la cual los fabricantes de vehículos tienen una postura cautelosa para mantener la garantía de sus productos para uso de B100 o mezclas con porcentajes grandes de biodiesel.

Los principales estándares de calidad son las normas ASTM D6751-03 empleada en los Estados Unidos y la norma EN 14214 usada en la Unión Europea. A pesar de tener muchos puntos en común, estas dos normas también presentan algunas diferencias importantes.

La norma ASTM D6751 es considerada adecuada para mezclas B20 o menores. Para mezclas con mayores porcentajes de biodiesel, o para uso de B100, no existe aún consenso entre los fabricantes de biodiesel, de vehículos, de sistemas de inyección y usuarios en los Estados Unidos.

Como el biodiesel se propone a sustituir el diesel de petróleo, los estándares de calidad para biodiesel (ASTM, EU, u otras) incluyen propiedades típicas de diesel, y otras específicas para este nuevo combustible, definiendo valores máximos, mínimos o el rango permitido para cada característica, así como el método de medición de cada característica. Las normas ASTM D6751 y EN14241 difieren en muchos aspectos: ni todas las propiedades son comunes y, aunque las propiedades pueden estar en ambas normas, los métodos de medida pueden ser diferentes. Para fines legales, sólo es considerado como biodiesel el producto que atienda todos los requisitos de la norma en uso en el país. Por ejemplo, el biodiesel de soya (aceptado como tal en Estados Unidos) no se califica como biodiesel en la Unión Europea por no atender a todas las características de la norma europea.

El cuadro 11 presenta una comparación entre los parámetros usados en las normas norteamericanas ASTM D975-04c (diesel) y ASTM D6751 (biodiesel) y las normas europeas, EN 590:2004 (diesel) y EN 14241:2003 (biodiesel). Los métodos de medida para cada propiedad fueron omitidos por claridad.

Las propiedades de las que constan las normas y especificaciones de calidad están asociadas a determinadas características que deben ser controladas para que la calidad del producto sea garantizada al consumidor:

- El *flash point* mínimo es definido para la seguridad del manejo del producto (inflamabilidad) y para garantizar que el biodiesel no posea mucho metanol libre, que hace caer el *flash point* (0,5% de metanol hace el *flash point* caer debajo de 55 °C). En la norma europea, la máxima cantidad de metanol es definida de forma explícita.
- La cantidad de agua y sedimentos indica presencia de agua contaminando el combustible, lo que puede causar corrosión y ambiente para micro-organismos. La oxidación del biodiesel hace aumentar la cantidad de sedimentos, por lo que esta propiedad puede ser

usada para evaluar si el biodiesel está “viejo” por oxidación. La norma europea mide separadamente agua, contaminantes y estabilidad a la oxidación.

Cuadro 11

## ESPECIFICACIONES DE DIESEL Y BIODIESEL: EUA Y UE

Propiedad	Norma unidad	Estados Unidos		Unión Europea	
		ASTM 975 – 04c diesel	ASTM 6751-03a biodiesel	EN 590: 2004 diesel	EN 14241: 2003 biodiesel
Flash point	°C	38 (n.1D) 52 (n.2D)	130	55	120
Agua y sedimentos	% vol	0,05	0,05	---	---
Agua (max)	mg/kg	---	---	200	500
Contaminación total (max.)	mg/kg	---	---	24	24
Destilación (90% o 85%EU)	°C	<288 (n.1) 282-338	<360	<350	---
Viscosidad cinemática	mm <sup>2</sup> /s	1,3 – 2,4 1,9 – 4,1	1,9-6,0	2,0 – 4,5	3,5- 5,0
Densidad	kg/m <sup>3</sup>	---	---	820 - 845	860 – 900
Contenido de ésteres (min)	%vol	---	---	< 5	> 96,5
Cenizas (% peso, max.)		0,01	---	0,01	---
Cenizas sulfatadas (% peso, max.)		---	0,02	---	0,02
Azufre (% peso, max.)		0,05 o 15ppm	0,05 o 15ppm	50 o 10 ppm	10ppm
Corrosión al cobre		< n.3	< n.3	clase 1	clase 1
Número de cetano (min.)		40	47	51	51
Índice de cetano (min.)		> 40	---	46	---
Aromaticidad (% vol max.)		35	---	---	---
PAH (% peso max.)		---	---	11	---
Uno de estos: Punto de enturbamiento CFPP / LTFT	°C,	regional	reportar	local & estación	local & estación
Residuo de carbón (% peso max.)		0,15 (n.1) 0,35 (n.2)	0,05	0,30	0,30
Número de acidez	mg KOH/g	---	0,80	---	0,50
Estabilidad a la oxidación	horas	---	---	---	> 6
Glicerina libre (% peso max.)		---	0,020	---	0,020
Glicerina total (% peso max.)		---	0,240	---	0,250
Contenido de fósforo (% peso max)		---	0,001	---	0,001
Número de yodo		---	---	---	< 120
Metanol (% peso max)		---	---	---	0,20
Metil-linolenato (% peso max)		---	---	---	12,0
Éster poli-insaturados (% peso max)		---	---	---	1,0
Mono-glicéridos (% peso max)		---	---	---	0,80
Di-glicéridos (% peso max)		---	---	---	0,20
Triglicéridos (% peso max)		---	---	---	0,20
Na + K	mg/kg	---	---	---	5,0
Ca + Mg	mg/kg	---	---	---	5,0
Lubricidad	µm	< 520	---	< 460	---

Fuente: ASTM 6751 y EN 14241

- La viscosidad es muy importante para determinar el tamaño promedio de las gotas que forman el chorro de combustible inyectado en el cilindro del motor. Si la forma del chorro y tamaño promedio de gotas de combustible es muy diferente de aquellos para el cual el motor fue proyectado, habrá problemas en la combustión, formación de depósitos, y el aceite de lubricación será contaminado por ésteres u otros productos de combustión incompleta.
- La cantidad de cenizas sulfatadas indirectamente mide la cantidad de álcalis del catalizador u otros compuestos que producen depósitos en el inyector o en el sistema de combustible.
- La cantidad total de azufre limita las emisiones de SO<sub>x</sub> producidos en la combustión y que en la atmósfera producen ácidos de azufre.
- La corrosión al cobre indica si existen problemas con componentes de cobre o sus aleaciones en el sistema de combustible del motor.
- El número de cetano es una medida de la calidad de ignición y un indicador del comportamiento del combustible para empezar la combustión. Mayores números de cetano mejoran el arranque en frío, disminuyen los humos blancos de arranque, mejoran la durabilidad del motor y disminuyen el nivel de ruido del motor.
- El punto de enturbamiento y otros indicadores de operación en bajas temperaturas (Cold Flow Plug Point – CFPP / Low Temperature Flow Test – LTFT) muestran las menores temperaturas ambientes donde el biodiesel puede operar sin calentamiento.
- Los residuos de carbón miden la tendencia a formación de depósitos de carbón en el inyector y en la culata del motor.
- El número de acidez indica el aumento de la existencia de ácidos grasos libres en el biodiesel en caso de mala calidad del producto o de degradación por oxidación.
- Los valores altos de glicerina libre y total indican problemas de separación entre el biodiesel y la glicerina, así como conversión incompleta (mono, di y triglicéridos que no reaccionaron). La norma europea presenta de forma explícita los contenidos de glicéridos no transformados (mono, di y triglicéridos).
- El contenido de fósforo es una medida indirecta de la eficacia de la conversión. El fósforo puede arruinar los catalizadores de los motores.
- La determinación del punto de 90% recogido en la destilación ayuda a prever el comportamiento de la combustión, porque las gotas líquidas del biodiesel que entran en el motor deben evaporarse y mezclarse con el aire caliente de la compresión para entonces quemarse.
- La lubricidad del biodiesel es mucho mayor que la del diesel de petróleo con baja cantidad de azufre. En realidad, la adición de un 2% de biodiesel en el diesel mejora su lubricidad de forma importante (más de 50% - Hilber y otros, 2005). La lubricidad es importante porque el sistema de inyección posee alta precisión mecánica y es lubricado por el combustible.

Una comparación de propiedades para biodiesel producidos de diferentes materias primas ya fue presentada en el cuadro 6.

## 4. La producción de biodiesel

### a) La cadena productiva del biodiesel

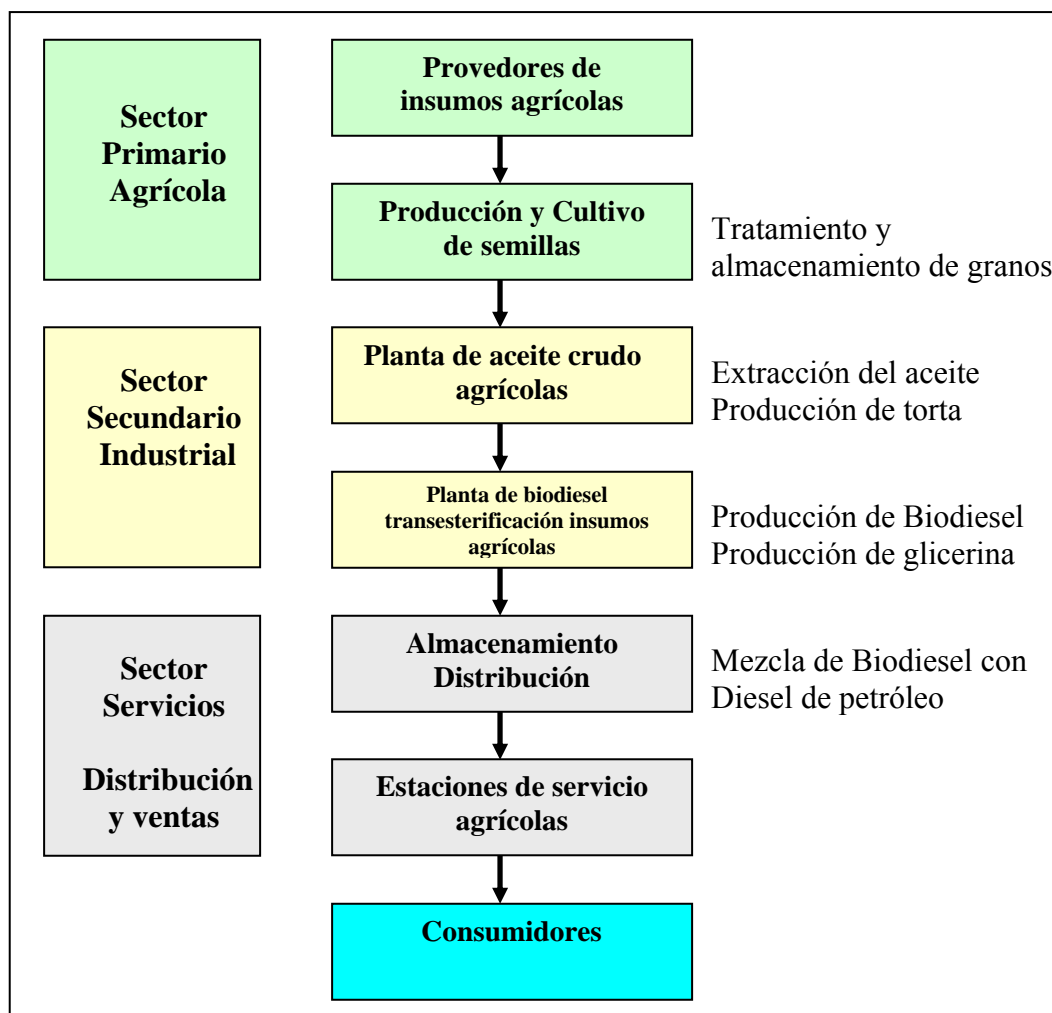
Desde el punto de vista conceptual, la producción de biodiesel a partir de aceites y grasas es muy sencilla: hacer la reacción de transesterificación de triglicéridos con un alcohol (en general el metanol) con presencia de catalizador alcalino y después separar las dos fases resultantes: el biodiesel y la glicerina. Esto se puede hacer con facilidad en cualquier laboratorio de química y al igual que en pequeñas instalaciones domésticas, lo que atrae la atención de las personas con la posibilidad de hacer su propio combustible.

Para producir biodiesel con la calidad necesaria para los motores diesel, de forma sostenible y posible de comercialización, el proceso de producción requiere mucho más. En realidad la producción comercial del biodiesel presupone la participación de los tres sectores productivos clásicos: el sector primario (agrícola), el sector secundario (industrial) y el sector terciario (servicios).

La figura 5 presenta la cadena productiva completa del biodiesel. El sector primario está representado por los proveedores de los insumos agrícolas y por la producción de las oleaginosas apropiadamente dichas: semillas o frutos.

Figura 5

#### LA CADENA PRODUCTIVA DEL BIODIESEL



Además de producir oleaginosas, el sector agrícola también realiza otras funciones tales como el tratamiento básico y el almacenamiento del producto hasta su transporte al sector industrial. Una buena productividad agrícola es fundamental para que el aceite tenga costos bajos.

El sector industrial en principio posee dos etapas: la extracción del aceite de las oleaginosas y la producción del biodiesel. En general, estas dos etapas no están integradas. La etapa de extracción de aceite constituye una industria que está orientada a la producción de aceites en grados comerciales, y tiene varios procesos con la finalidad de obtener la calidad necesaria para cada uno de los usos del aceite, dictados por el mercado a ser atendido. Como ejemplos, el proceso puede ser muy sencillo como ocurre con la extracción del aceite virgen de oliva, o muy complejo, como el que ocurre con el aceite de soya para fines comestibles, que es desgomado, neutralizado, desodorizado y eventualmente hidrogenado.

La extracción del aceite puede hacerse de forma mecánica o con empleo de solventes. La extracción mecánica consiste en aplastar las semillas separando el aceite del producto restante, que forma la llama “torta”. Existen varios modelos de extractores mecánicos, cada uno más adecuado a ciertos tipos de oleaginosas o a la capacidad de la instalación: la prensa extractora que retira hasta 80% del aceite, la prensa tornillo un poco menos eficiente y la prensa hidráulica manual que es la menos eficaz y retira tan solo un 60%-65% del aceite.

Para obtener altas eficiencias de extracción (hasta 98%) con bajo costo, la extracción con solvente es la más eficaz. En general, se emplea el hexano como solvente. Esta técnica puede ser empleada después de la extracción mecánica o de forma aislada. El material oleaginoso es saturado con solvente y el aceite se disuelve en el solvente. La torta es separada de la fase líquida y después se hace la separación del solvente por destilación. El solvente es entonces reciclado para otra extracción. La torta posee aún un poco de hexano que debe ser retirado antes de su uso para alimentación animal.

La segunda etapa industrial es la producción del biodiesel a partir del aceite. En primer lugar, la materia prima debe ser preparada para una reacción eficiente. Para que la transformación de triglicéridos en biodiesel sea eficiente, es necesario poner considerable exceso de metanol, el cual quedará en la fase de la glicerina. El biodiesel producido en la transesterificación necesita ser purificado. Para que los subproductos puedan ser aprovechados, el metanol debe ser recuperado de la fase de glicerina y la glicerina, a su vez, debe ser purificada para poder ganar condiciones de comercialización. Esta etapa está detallada adelante.

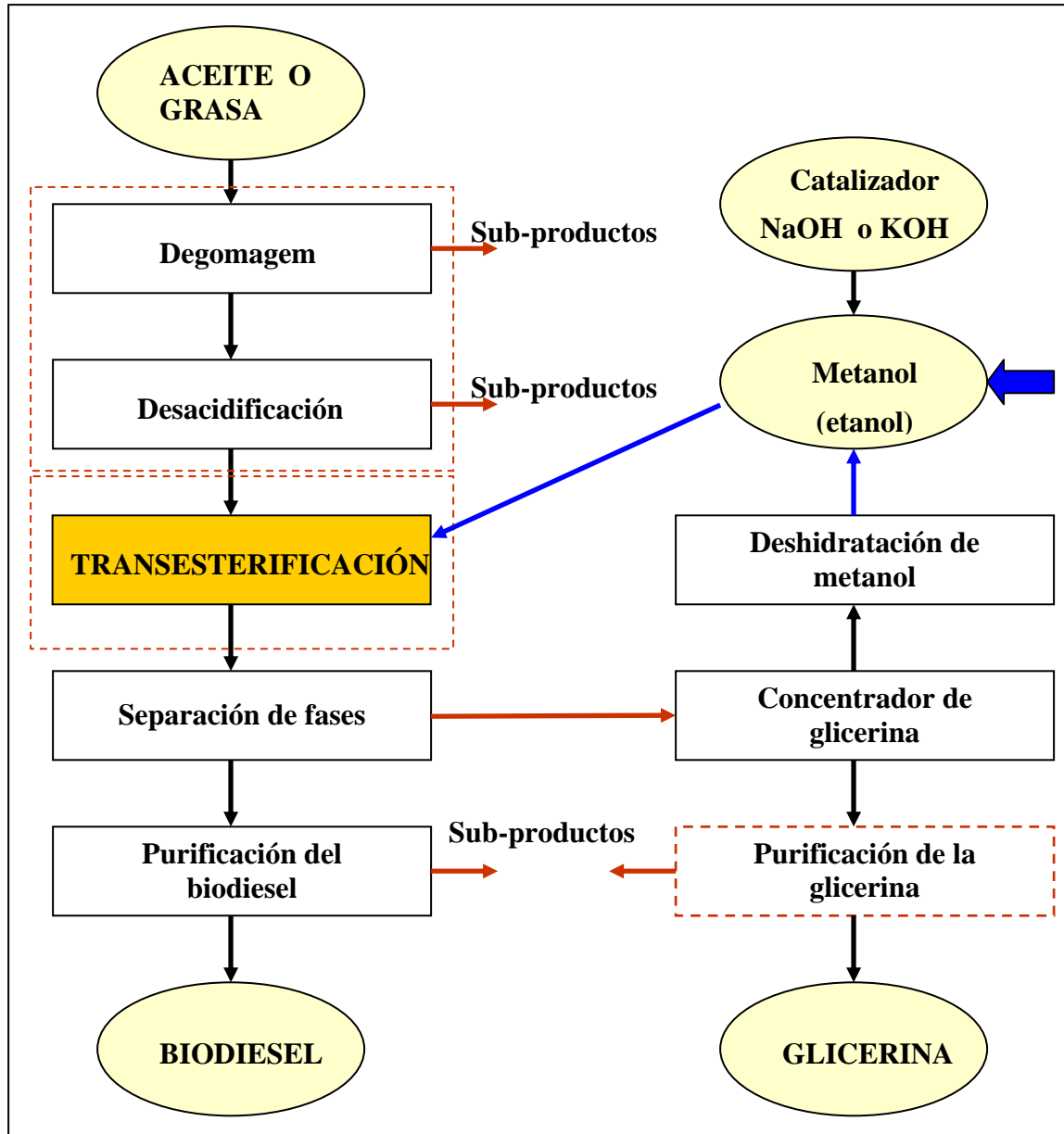
Después de producido, el biodiesel necesita llegar hasta los consumidores. En fases iniciales de implementación, el biodiesel puede ser distribuido para flotas o servicios que tengan su propio sistema de almacenamiento. Para la comercialización amplia, es necesario que los distribuidores de combustibles y estaciones de servicio estén integrados al proceso y preparados para almacenar el biodiesel, hacer la mezcla con diesel y atender a los consumidores individuales.

## **b) La planta de biodiesel**

La figura 6 muestra de forma esquemática los diferentes procesos para la producción del biodiesel.

Figura 6

## PROCESO DE PRODUCCIÓN DEL BIODIESEL



La primera etapa es la preparación de la materia prima. Esta etapa tiene como objetivo crear las mejores condiciones para hacer efectiva la reacción de transesterificación con alta tasa de conversión del aceite o grasa en biodiesel. Los aceites brutos necesitan ser desgomados. A veces, es necesario deshidratar la materia prima; otras veces es necesario reducir su acidez, causada por FFA's (free fat acids – ácidos grasos libres) que pueden comprometer la reacción de transesterificación y la calidad del biodiesel; otras veces, es necesario retirar materiales extraños y sales de la materia prima.

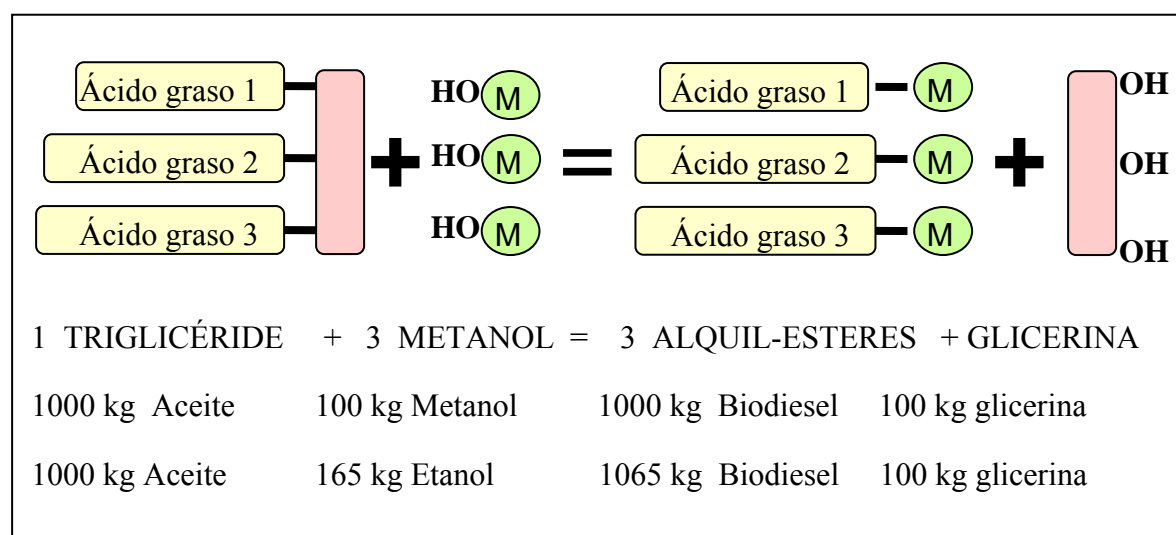


Para cada tipo de materia prima puede ser necesaria una combinación de procedimientos. Esta etapa es aquella que pone mayores dificultades para aprovechar aceites o grasas con propiedades muy variables, como ocurre con las materias primas alternativas, descritas abajo.

La reacción de transesterificación propiamente dicha es la etapa de conversión del aceite o grasa en biodiesel. En la figura 7 se muestra, de forma esquemática, el proceso de transesterificación: a cada molécula de triglicérido se adicionan tres moléculas de metanol produciendo tres moléculas de alquil ésteres (biodiesel) y una molécula de glicerina. Para mayores detalles sobre el mecanismo y las reacciones de transesterificación, véase el anexo IV.

Figura 7

### ESQUEMA DE LA REACCIÓN DE TRANSESTERIFICACIÓN



Es necesario resaltar, que la transesterificación es una reacción reversible. Entonces, para que la conversión en biodiesel de los triglicéridos presentes en el aceite sea alta, se necesita de metanol en exceso y un catalizador alcalino, generalmente el hidróxido de sodio o de potasio.

Las cantidades de aceite y metanol empleadas y las cantidades de biodiesel y glicerina obtenidas que se indican en la figura 7 son teóricas, pues no toman en cuenta las pérdidas del proceso ni el exceso de metanol. El cuadro 12 presenta los resultados reales obtenidos.

Cuadro 12

### CANTIDAD DE BODIESEL OBTENIDA DE 1.000 KG DE ACEITE

Materias primas		Productos del proceso	
Reactivos	Peso / kg	Productos	Peso / kg
Aceite	1 000	Biodiesel	942,4
Metanol	140	Glicerina + impurezas	206,9
Hidróxido de potasio	9,3	-----	----
Total reactivos	1 149,3	Total productos	1 149,3

Fuente: Candeia y otros, 2006

Después de la reacción, existen dos fases distintas: la fase del biodiesel (más ligera) y la fase de la glicerina (más pesada). La fase de glicerina está compuesta por glicerina bruta, impregnada por exceso de metanol, agua e impurezas de la materia prima. La fase de biodiesel está compuesta por una mezcla de ésteres metílicos (el biodiesel) impregnada también por impurezas, en particular el metanol. La separación de estas dos fases puede ocurrir por decantación o por centrifugación.

Acto seguido, los alquil-ésteres producidos (biodiesel) deben ser purificados, es decir, en general lavados y deshidratados, o filtrados para eliminar las impurezas y alcohol residual para garantizar la calidad adecuada del producto a los motores diesel, expresada a través de sus especificaciones técnicas.

La fase de glicerina bruta debe sufrir un proceso de concentración, con recuperación del alcohol, en general, por evaporación de los volátiles. En particular, la mayor parte del exceso de alcohol sale en esta fase.

Todo el alcohol recuperado está hidratado. Para poder ser reusado en la reacción, el alcohol debe ser deshidratado por destilación (caso del metanol) o por otros métodos (caso del etanol).

Para obtener mejores precios para la glicerina, la glicerina bruta puede ser purificada empleando destilación en vacío, resultando una glicerina límpida y transparente, de mayor valor económico. El residuo de este proceso, alrededor de 10% del peso inicial puede aún tener aplicaciones.

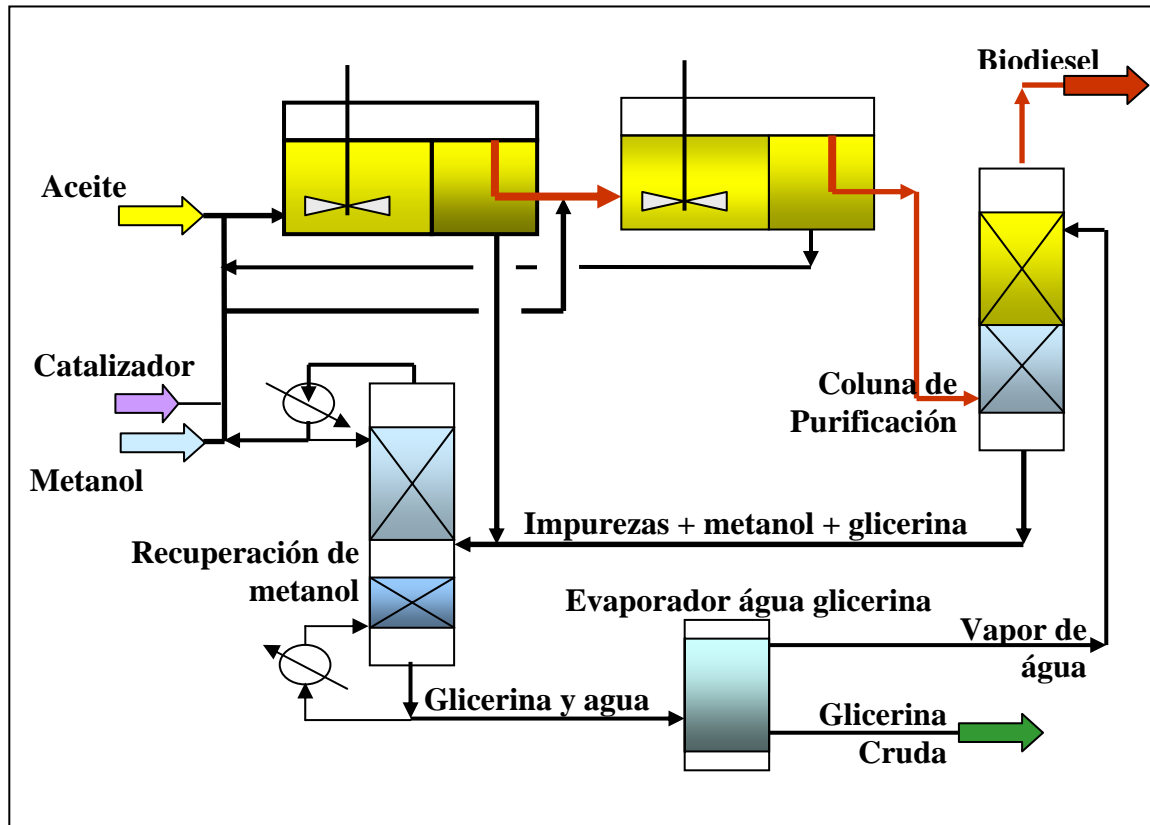
### **c) Los equipamientos de la planta de biodiesel**

El montaje de una planta de producción de biodiesel puede ser hecha por encomienda a talleres del sector químico. Ya existen empresas especializadas en construir plantas de biodiesel para diversas capacidades de producción con proyectos modulares ya definidos. En primer lugar, se debe definir el tamaño de la planta, es decir, su capacidad de producción nominal. En segundo lugar, es necesario definir si el proceso de transesterificación operará por bateadas o en sistema de flujo continuo. En general, para instalaciones de menor capacidad y que no tengan un uso muy alto, el sistema por bateadas resulta más económico. Sistemas de mayor capacidad o en los que se emplearán régimen de producción continuada deben usar el sistema de esterificación en flujo continuo.

En la figura 8 se muestra el proceso Lurgi de producción en flujo continuo de biodiesel, el más empleado según Lurgi (2007). Aceite, metanol y catalizador alimentan el reactor 1, donde son mezclados; con la reacción de transesterificación, ocurre una separación de dos fases. La fase más ligera, constituida por ésteres y aceite, es drenada para el segundo reactor, donde recibe metanol y catalizador adicionales. Esta segunda etapa de reacción maximiza la eficiencia de uso del aceite, reduce la cantidad de mono y diglicéridos y mejora la calidad del biodiesel. También en este reactor ocurre la separación de fases, en donde la fase ligera (biodiesel) es conducida por una columna de purificación donde el biodiesel es lavado con agua, que remueve la glicerina y metanol residuales, así como otras impurezas. El producto final debe ser seco.

Figura 8

## EL PROCESO LURGI DE PRODUCCIÓN CONTINUADA



La fase más pesada del reactor 2 contiene glicerina y aún mucho metanol y catalizador, por lo que es reciclada para el reactor 1. La fase más pesada del reactor 1 contiene glicerina, mucho metanol y otras impurezas y es conducida a un destilador que hace la recuperación del metanol, para reciclarlo. El agua empleada para lavar el biodiesel es conducida también para el recuperador de metanol. En la destilación, el metanol a ser reciclado sale en la parte de arriba y en el fondo sale una mezcla de agua, glicerina e impurezas. Para reducir el consumo de agua y hacer la concentración de la glicerina, esta mezcla va a un evaporador, donde el agua se evapora y es reconducida para la columna de purificación. La glicerina cruda posee una concentración alrededor del 80% y contiene las impurezas retenidas en el proceso. Para obtener mejores precios, la glicerina debe ser purificada por destilación.

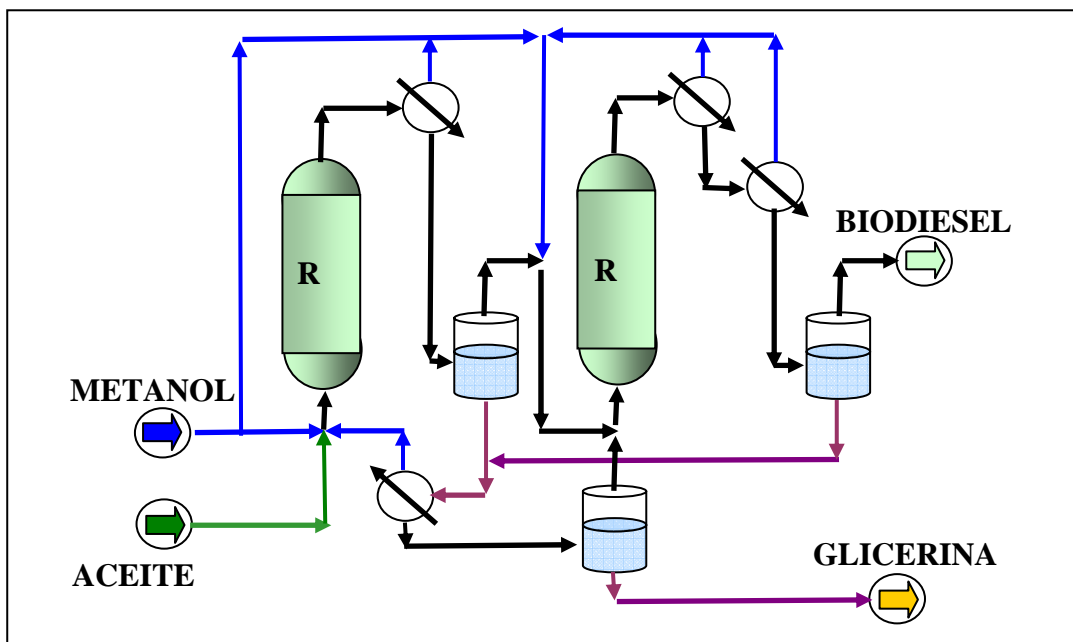
Las características más interesantes del proceso Lurgi son que puede ser adoptado para muchas materias primas diferentes, opera a presión atmosférica y con temperatura alrededor de 60°C, recupera metanol en exceso y el agua, la separación de fases ocurre por gravedad (no emplea centrifugas). Su eficiencia de conversión del aceite es de alrededor del 98%.

La empresa Axens, que desarrolla comercialmente los proyectos del Instituto Francés del Petróleo, hizo la propuesta de un sistema de producción de biodiesel también con dos reactores en serie, pero con catalizadores sólidos fijos, por lo que no es necesario alimentar el proceso con

catalizador y la separación del biodiesel y glicerina se vuelve más simple. La figura 9 presenta esquemáticamente el proceso que se presta a grandes volúmenes de producción.

Figura 9

EL PROCESO AXENS



Una planta de producción del biodiesel con este proyecto está en construcción en la ciudad de Beatrice, Estados Unidos, desde septiembre de 2006, con capacidad de producción de hasta 165.000 toneladas anuales. Utiliza como materia prima la soya y las especificaciones prevén la producción de biodiesel de alta calidad y glicerina de 98% de pureza. La inversión en la planta es de US\$ 52,5 millones y su operación está prevista para el año 2007.

Las ventajas anunciadas del proceso con catalizador sólido son la alta pureza de la glicerina (98% min.), la gran eficacia de conversión de aceite en biodiesel (~100%), la inexistencia de sub-productos a tratar (ni FFA, ni aguas de proceso), y que no hay consumo de sustancias químicas ni se maneja el catalizador (Cameron, 2005).

Las empresas que ofrecen equipos para producción de biodiesel pueden ser clasificadas en dos tipos: las tradicionales productoras de equipos, es decir, para la industria química, petroquímica u oleoquímica, y las empresas creadas para producir plantas de biodiesel. El cuadro 13 presenta algunas empresas escogidas que poseen plantas ya en operación. En el Internet se pueden encontrar muchas más, pero en general no están aún establecidas con plantas en operación para demostrar su capacidad técnica.

Cuadro 13

## EMPRESAS QUE FABRICAN EQUIPOS PARA BIODIESEL.

Empresa – país	Ramo de actuación	Plantas en operación	Capacidad mil t/año
Lurgi AG - Alemania	Petroquímica, aceites	38	40 – 250
Savoia Power – Argentina	Biodiesel	30	0,25 – 1
Flowtec – Brasil	Equipos industriales	30 <sup>a</sup>	0,1 – 0,3 batelada 4 – 13 continuo
DesmetBallestra – Italia	Oleoquímica	19	10-100
BioDiesel Int. – Austria	Biodiesel	14	5 – 50
BioDieselTech/ BDT- Aust.	Biodiesel	10	3 – 7
Dedini S.A. – Brasil	Equipos azúcar/ alc.	5	20-100
Biodiesel Industries - USA	Biodiesel	4	10
Energea – Austria	Biodiesel	3	40 – 250
Renewable Energy – USA	Biodiesel	3	36 – 90
Axens – IFP - Francia	Petróleo y petroquim.	3	20 – 100
Nova Biosources – USA	Biodiesel	1	33
JatroDiesel – USA	Biodiesel	1	3 – 6

Fuente: Sitios de Internet de cada empresa.

a/ Las referencias presentadas son las mismas que las de la Savoia Power.

Algunas características de un dado proceso de producción pueden ser muy importantes para su implementación exitosa:

- La posibilidad de operar con varias materias primas, no sólo aceites de varias oleaginosas, sino también aceites usados reciclados y grasa animal.
- Control de olores de la planta, especialmente si la instalación de producción está próxima a residencias.
- Producción con baja generación de residuos que puedan impactar al medio ambiente, ya sean sólidos o líquidos (lama, aguas ácidas, etc.). El tratamiento y destino adecuados de estos residuos es fundamental para que la producción sea sostenible.

#### d) Las materias primas usuales

Para el proceso de transesterificación se emplean tres materias primas básicas: el aceite o grasa, el alcohol y el catalizador de la reacción. En situaciones en que el aceite deba ser tratado antes de la reacción, otros insumos serán necesarios. Lo mismo ocurre si la fase de glicerina es tratada a fondo.

Una discusión acerca de los aceites vegetales ya fue presentada al inicio de este capítulo. Los principales aceites en uso para producción de biodiesel son el aceite de colza en Europa, de soya en los Estados Unidos, y de palma en Malasia. Los aceites de girasol, de maní y de algodón también pueden ser empleados con facilidad. Otras oleaginosas pueden ser empleadas, pero el volumen de su producción no es aún adecuado. En particular, especies que no tienen uso actual para su aceite y son de alta productividad pueden tornarse muy importantes, como el piñón (tempate) y otras especies aún poco exploradas.

El alcohol que normalmente se usa es el metanol, aunque otros alcoholes de mayor cadena carbónica pueden también ser empleados, como el etanol, el propanol y el butanol. El metanol presenta mayor reactividad que los otros y menores costos. El metanol es un producto que proviene de la industria petroquímica. En general, es producido por gases de síntesis del gas natural. Desde el punto de vista ambiental, lo más correcto sería emplear un alcohol de origen renovable para que el bioetanol sea más interesante. Más adelante se hace una pequeña discusión sobre las ventajas y desventajas del metanol frente al etanol.

El metanol posee otros nombres, como metil alcohol, carbinol y alcohol de madera metil hidróxido. Su manejo es peligroso, no sólo por su volatilidad e inflamabilidad, como también ocurre para el etanol, pero también porque es tóxico. Su MSDS (material safety data sheet) presenta varias posibles consecuencias a su exposición (Oxford Univ, 2006):

- Toxicología: tóxico por inhalación, ingestión o absorción por la piel. Puede tener efectos en la reproducción humana. Su ingestión puede ser fatal. Riesgos de serios daños irreversibles si es bebido. La exposición puede causar daños a los ojos, hígado y corazón. Una exposición crónica o aguda grave puede causar incluso ceguera. Irritante. Narcótico. Límites de exposición: 200 ppm para largo plazo, 250 ppm para corto plazo.
- Para el manejo, se deben emplear protecciones individuales: lentes de seguridad, guantes y evitar inhalación.
- Para el transporte, códigos UN 1230, empaquetamiento grupo II. Clase de peligro 3.

La presencia de agua en el alcohol empleado en la reacción es muy dañina: inhibe la formación del metóxido de sodio o potasio (catalizador), reduce la velocidad de la reacción y favorece la formación de jabones, que son productos indeseables en la producción del biodiesel. Así, sea metanol o etanol, el alcohol debe ser anhidro.

Un catalizador es necesario para la reacción, pero los catalizadores pueden variar de acuerdo con el proceso de producción adoptado. El hidróxido de sodio (NaOH) y el hidróxido de potasio (KOH) son los más eficaces y baratos. Algunos detalles de la participación de los catalizadores en el proceso pueden encontrarse en el Anexo IV. Aunque no sea consumido en la reacción, a veces es difícil separar y purificar el catalizador para su uso en una nueva carga. En general, son descartados con otros sub-productos. El hidróxido de potasio tiene la ventaja de ser usado como fertilizante agrícola.

Existen investigaciones destinadas a obtener nuevos catalizadores más eficaces, en especial los de fase sólida, que pueden ser separados de los productos de la reacción con facilidad y reciclados para el inicio del proceso.

#### **e) Las materias primas alternativas**

Los aceites vegetales son las materias primas usuales para hacer el biodiesel, aunque existen otras posibilidades como grasas animales y aceites descartados de procesamiento doméstico, comercial u industrial.

Muchas grasas animales poseen alto valor nutricional o económico (aceites de tuétano, algunos aceites de pescados); otras atienden a mercados de la química del jabón y cosmética;

otras todavía son de baja utilidad y no es raro que constituyen problemas ambientales asociados a la industrialización de la carne (de ganado, de pollo y de cerdo) o del cuero como en carnicerías. También en los tratamientos de alcantarillas se produce una borra, que es un sedimento espeso y aglutinado, rica en grasas. Las grasas animales más adecuadas a la producción del biodiesel serán aquellas de menor valor económico, pero con pocas impurezas.

Los aceites residuales descartados de industrias de alimentos o para freír en restaurantes y en viviendas, también constituyen materias primas de bajo costo de adquisición.

Los aceites descartados y las grasas animales de bajo costo presentan dificultades para su aplicación en la fabricación de biodiesel, asociadas a la logística de recolección y transporte desde los puntos de su producción descentralizada hasta la planta de biodiesel. Además, la gran variación de las propiedades y características de estas materias primas crean dificultades para el control de calidad del biodiesel producido y, en general, requieren de un procesamiento preliminar para reducir la acidez y presencia de sales que pueden perjudicar el proceso de producción del biodiesel.

#### **e) Los co-productos y subproductos de la producción de biodiesel**

Los principales co-productos de producción del biodiesel son la glicerina y el alcohol en exceso. Cuando se describió el proceso de producción del biodiesel, se hizo notar que es muy importante tratar de forma adecuada estos subproductos y definir cuales son los procesos a adoptar.

El aprovechamiento del alcohol en exceso y recuperado es fundamental ya que se recomiendan desde 50% (metanol) hasta 300% (etanol) de exceso de alcohol en la reacción de transesterificación. La recuperación y deshidratación del alcohol permite su reutilización en la reacción, disminuyendo la necesidad de alcohol nuevo para reposición de las cantidades efectivamente usadas en la reacción y eventuales pérdidas. Para cada 1.000 l de biodiesel producido se tienen alrededor de 50 kg (para metanol) o 400 kg (para etanol) de alcohol en exceso.

La producción de glicerina ya sea bruta (alrededor de 65% glicerina) o destilada (arriba de 95%) también es muy importante por varias razones: no se puede descartar esta fase por motivos ambientales y los precios de la glicerina ayudan a viabilizar económicamente el proyecto. La cantidad de glicerina producida es de alrededor de 100 kg por cada 1.000 l de biodiesel. Las principales impurezas presentes en la glicerina bruta producida en la transesterificación son agua, catalizador, trazos de ésteres, y propanodiol.

El mercado de glicerina es sensible a la penetración del biodiesel en grandes cantidades. En los Estados Unidos los precios de la glicerina en el 2003 estaban alrededor de 1.000 US\$/ton y en junio de 2006 estaban entre 620 y 860 US\$/ton (grado farmacéutico: 1.300 US\$/ton, pureza > 99,5%). Existe el temor de que los precios de la glicerina sean muy presionados por su oferta en volúmenes que el mercado farmacéutico o de cosméticos no soporta. En la Unión Europea, donde la producción de biodiesel es alta, los precios de la glicerina ya son más bajos que en Estados Unidos: entre 550 a 620 US\$ / ton. Por otro lado, con la caída de los precios de la glicerina, las posibilidades de su empleo en otras aplicaciones hasta ahora no atractivas se pueden materializar, movimiento que puede evitar depreciación elevada de los precios en el mercado de la química de la glicerina. Los subproductos del procesamiento de la glicerina deben ser tratados de forma conveniente.

De ser posible, cuando los aceites vegetales sufren tratamientos antes del proceso de transesterificación, los sub-productos asociados deben ser tratados para obtener varios productos de gran valor agregado. Por ejemplo, si el aceite sufre el proceso de desgomagen, el subproducto (gomas) puede originar lecitina comercial o pura (especialmente en el caso de la soya), así como fosfatídeos de gran valor (colina). Las borras (sedimentos espesos y aglutinados) del proceso de neutralización de aceites ácidos pueden ser empleadas para la fabricación de jabones. Los constituyentes insaponificables (3% de la borra), en general, son constituidos por esteroides de amplio uso farmacéutico. En caso de desodorización del aceite, los sub-productos contienen esteroides y tocofenoles (pró-vitamina E).

#### **f) La ruta metílica o etílica**

El proceso de producción de biodiesel necesita de un alcohol para la reacción. En principio, los alcoholes más adecuados por su costo y disponibilidad son el metanol y el etanol. Por varias razones que serán expuestas a continuación, el metanol sigue siendo el alcohol más empleado en la transesterificación.

Las rutas metílica y etílica pueden ser comparadas por diferentes criterios: adecuación técnica al proceso de reacción, adecuación económica y adecuación ambiental. Para países que producen etanol de biomasa con eficiencia, la ruta etílica es la que ofrece mayores beneficios ambientales: todas las materias primas serían renovables (aceites y bioetanol). Por otro lado, la producción de metanol es proveniente de procesamiento de petróleo o gas natural, por lo que su origen se convierte en un punto negativo.

Desde el punto de vista técnico de la reacción, el metanol presenta ventajas: requiere menor cantidad de alcohol en exceso que aquella requerida por el etanol, posee mayor eficiencia de conversión de aceites, requiere menores temperaturas de reacción y posee menor tiempo de reacción, como se presenta en el cuadro 14.

Con etanol, la formación del catalizador (etanoato) es reducida porque los enlaces en el etanol son más fuertes que en el metanol lo que conduce a velocidades de reacción menores (Ferrari y otros, 2005). Por otro lado, no se puede usar exceso de catalizador porque esto conduce a la formación de jabones y reduce la producción de biodiesel. Para uso de etanol, la potasa (KOH) es más soluble que la soda (NaOH).

Cuadro 14

#### BIODIESEL: ¿ETANOL O METANOL?

Propiedad	Ester metílico	Ester etílico
Conversión aceite -> biodiesel	97,5%	94,3%
Glicerina total en el biodiesel	0,87%	1,40%
Viscosidad a 40 C	3,9 a 5,6 cSt	4,2 a 6,0 cSt
Tiempo de reacción	Menor	mayor
$\Delta$ potencia (relación al diesel)	2,5% menor	4% menor
$\Delta$ consumo (relación a diesel)	10% mayor	12% mayor

Fuente: Schuchardt y otros, 1998.



La tecnología de producción en gran escala de biodiesel con etanol aún debe ser desarrollada. A pesar que los precios del metanol de origen fósil son menores que los precios del etanol, la gran ventaja de éste es su origen renovable, que contribuirá a la valorización del biodiesel obtenido con etanol (menores emisiones de gases de efecto invernadero).

El uso de metanol conduce a los ésteres metílicos y el uso de etanol a los etílicos. Al igual que cuando provienen de una misma materia prima, existen algunas diferencias de propiedades entre ellos, se indica en el cuadro 15. Se pueden producir ésteres de ácidos grasos con uso de otros alcoholes, como el propanol o el i-butanol, pero las diferencias de propiedades no justifican los precios muchos más elevados de los alcoholes superiores (arriba de dos átomos de carbón). Los ésteres etílicos en general poseen mayor número de cetano y mayor calor de combustión, lo cual es positivo, aunque también tendrán mayor viscosidad.

Cuadro 15

## DIFERENCIAS ENTRE EL BIODIESEL METÍLICO Y ETÍLICO

	Calor de combustión	Número de cetano	Densidad	Viscosidad
	MJ/kg		Kg/m <sup>3</sup>	cSt
Soya – metílico	39,8	47,2	0,885	4,1
Soya – etílico	40,0	48,3	0,881	4,4
Colza – metílico	40,1	54	0,883	6,0
Colza – etílico	41,4	56	0,876	6,2
Ganado – metílico	39,4	68	0,876	4,1
Ganado – etílico	40,6	70	0,871	4,8

Fuente: Van Gerpen, 2006, NREL 2001.

Como se puede constatar, el principal problema que limita el empleo del bioetanol para producción de biodiesel es de naturaleza técnica. Desde el punto de vista de sostenibilidad, ésta sería la mejor opción. En Brasil, los productores de bioetanol preferirían que el bioetanol fuera empleado para producción de biodiesel. Alrededor de 130 litros de bioetanol son empleados para producir 1.000 litros de biodiesel. La demanda de bioetanol, por lo tanto, es de alrededor del 13% del volumen de bioediesel a ser producido.

### 5. La calidad del biodiesel y sus efectos en el motor

Las experiencias realizadas por varios grupos de investigación en muchos países indicaron que los ésteres de aceites vegetales son combustibles renovables adecuados para la sustitución del diesel. Por otro lado, varios experimentos demostraron que la calidad del biodiesel es muy importante para que el motor no sufra problemas en la operación y en su durabilidad.

Los puntos críticos para un proceso de obtención de biodiesel de alta calidad para uso en los motores diesel son:

- Garantizar la reacción completa hasta el éster mono-alquilado.

- Hacer buena remoción de la glicerina libre.
- Remover el catalizador residual de la fase de biodiesel.
- Remover el alcohol de la fase de biodiesel.
- Garantizar la ausencia de ácidos grasos libres en el biodiesel.

Por otro lado, algunas características técnicas del biodiesel son siempre mejores que las del diesel de petróleo común:

- Número de cetano más elevado.
- Naturalmente oxigenado – reducciones de emisiones de CO, HC y humos.
- Cantidad de azufre baja, pero no se puede olvidar que ya existen aceites diesel de muy baja cantidad de azufre (< 15 ppm) y, en estos casos, la cantidad de azufre del biodiesel puede ser importante.
- Cantidad de hidrocarburos (o derivados) aromáticos es muy baja frente al diesel; menor tendencia a formación de partículas en la combustión.
- Mayor lubricidad que el diesel, que le hace un aditivo natural para aceites diesel de muy baja cantidad de azufre, que no tienen buena lubricidad.

Las especificaciones técnicas del biodiesel, ya presentadas anteriormente, tienen el objeto de garantizar las buenas condiciones de la calidad del biodiesel producido, de igual forma es importante que los motores sean ensayados para verificar si no existe algún problema que no haya sido previsto, lo cual es muy común por tratarse de un producto nuevo y con procesos de producción muy diversos y tecnologías aún en desarrollo.

Como se analizó al inicio de este capítulo, la buena combustión en un motor diesel está directamente ligada a la distribución estadística del tamaño de las gotas de combustible inyectadas, al formato del chorro y a la calidad intrínseca del combustible (en especial el número de cetano). Así, es importante que las diferencias de viscosidad, densidad, tensión superficial, volatilidad y módulo de elasticidad entre el biodiesel y el diesel de petróleo sean probadas en el motor para que el efecto de la forma del chorro, tamaño promedio de gotas y atraso de ignición (*ignition delay*) no influyeran de modo negativo la combustión y el consumidor no tenga perjuicios.

En general, estas son las cuestiones que los fabricantes de vehículos ponen para mantener la garantía de fábrica para mezclas diesel / biodiesel con grandes cantidades de biodiesel (B20 a B100). Para cantidades pequeñas de biodiesel (B2 hasta B5), no se prevén mayores problemas al motor. De esta forma, un mismo fabricante puede aprobar el uso de B100 para un dado modelo y apenas B20 ó B5 para otro. En general, en Europa los fabricantes aprobaron el biodiesel particular, el metil éster de colza, y proporcionan garantía apenas para este biodiesel, porque ya lo probaron. Otro biodiesel hecho de otras materias primas puede no ser aprobado por el fabricante antes que se hayan realizado las pruebas y el biodiesel no presente problemas.

Como los mayores problemas ocurren por causa de la inyección, los fabricantes de sistemas de inyección son los que tienen mayor cautela en aprobar el uso de biodiesel. Uno de los mayores fabricantes de sistemas de inyección (Bosch, 2006) mostró sus mayores preocupaciones con relación a la calidad de biodiesel, que se reproduce en el cuadro 16, junto a resultados de otros investigadores.

Cuadro 16

## LAS CARACTERÍSTICAS DEL BIODIESEL Y PROBLEMAS EN LOS MOTORES

Característica	Sistema de inyección	Motor y desempeño
Glicerina libre	Corrosión, sedimentos, formación de barnices	Pérdida de potencia, aumento de humos, sin arranque
Álcalis (Na, K, Ca, Mg)	Sedimentos; falla de la pompa y del inyector	Pérdida de potencia, aumento de humos, sin arranque, falla total del motor
Clima frío (viscosidad) Polímeros insolubles (gomas, borras) <sup>a</sup> de oxidación	Durabilidad del sistema de inyección, atomización precaria Obstrucción de filtros, depósitos en el sistema, desgaste de componentes, <i>coking</i> del inyector	Sin arranque, parada total del motor Pérdida de potencia, aumento de emisión de humos, sin arranque, parada total del motor
Polímeros solubles (oxidación)	Formación de resinas	Parada total del motor; sin arranque
Ácidos grasos libres (oxidación)	Corrosión de metales; formación de jabones con metales	Pérdida de potencia, aumento de emisión de humos, parada total del motor, sin arranque
Peróxidos (oxidación)	Fragilización de elastómeros	Vertimiento de combustible, pérdida de potencia
Metanol libre	Corrosión de aluminio y zinc.	Pérdida de potencia, bajo flash point (inflamabilidad)
Agua en el biodiesel	Reversión de ésteres a ácidos grasos; formación de jabones; obstrucción de filtros	Pérdida de potencia, sin arranque, parada total del motor

Fuente: Bosch, 2006, Nigro, 2001

a/ Sedimento espeso aglutinado, material con consistencia gelatinosa.

La compatibilidad entre el biodiesel y los materiales empleados en el sistema de combustible es otro punto de preocupación. El biodiesel puede causar daño a algunos materiales, así como algunos materiales pueden causar daño al biodiesel y afectar sus propiedades. El biodiesel no debe estar en contacto con cobre y sus aleaciones, zinc, plomo y latón. Para almacenamiento del biodiesel se recomienda el uso de aluminio, acero y acero inoxidable. Las tuberías no pueden ser galvanizadas.

El cuadro 17 presenta la compatibilidad de algunos elastómeros con el biodiesel, y debe ser tomada como indicativa. El efecto del biodiesel sobre el polivinil mostró que si el biodiesel está mezclado con diesel en bajo porcentaje, los efectos son muy menores y no se prevén problemas con este material en tiempos razonables. Otros materiales presentan comportamientos similares. Cuando se pretende usar biodiesel puro o con porcentaje alto en mezcla con diesel, entonces los efectos del biodiesel sobre los elastómeros deben ser tomados en cuenta.

Cuadro 17

## COMPATIBILIDAD ENTRE BIODIESEL Y ELASTÓMEROS

Material	BXX	Comparación con diesel de petróleo
Teflón	B100	Poca alteración
Nylon 6/6	B100	Poca alteración
Nitrile	B100	Mucho peor, todas propiedades
Viton A401-C	B100	Poca alteración
Viton GFLT	B100	Poca alteración
Fluorosilicón	B100	Entumecimiento
Poliuretano	B100	Entumecimiento
Polipropileno	B100	Entumecimiento
Polivinil	B100	Mucho peor
	B50	Peor
	B30	Peor
	B20	Poca alteración
	B10	Comparable
Tygon	B100	Peor, todas las propiedades

Fuente: NREL, 2001.

## 6. Otras tecnologías para modificar aceites vegetales

Desde que quedó claro que el empleo de aceites vegetales puros en motores no era posible sin que los motores fuesen modificados a fondo, varios procesos de modificación de los aceites vegetales fueron propuestos. Sin duda, el proceso más conocido y que tiene mayor éxito técnico y económico es la transesterificación; su producto, el biodiesel (alquil ésteres de ácidos grasos), ya fue analizado en detalles en este capítulo.

Para modificar los aceites vegetales y grasas animales y generar biocombustibles que puedan ser empleados en motores diesel, existen dos alternativas técnicas más: la pirolisis o *cracking* térmico del aceite y el hidro-tratamiento en refinerías, con el diesel de petróleo.

### a) El *cracking* (pirolisis) de aceites y gorduras

De forma general, la pirolisis o *cracking* térmico es un proceso de conversión química causada por aplicación de energía térmica. El *cracking* térmico o pirolisis de aceites o grasas es la quiebra de las moléculas de triglicéridos por efecto térmico sin la presencia de oxígeno. En general, para facilitar el proceso y aumentar la productividad de las fracciones deseadas, se adopta algún catalizador como el óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) o alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). La temperatura de operación queda entre 300° y 500 °C dependiendo de las materias primas. El proceso debe ser conducido a presiones moderadas. Los productos de la pirolisis deben entonces ser separados por un rango de temperatura de ebullición (fraccionamiento). En la descomposición térmica se forman parafinas y olefinas, cíclicas y lineares, así como productos oxigenados (aldehídos, cetonas, ácidos carboxílicos).

En la Universidade Federal do Ceará (Brasil), experimentos con la pirolisis de aceites en los años ochenta, produjeron los siguientes resultados: para 1.000 litros de aceite, se obtuvieron 600 litros de productos similares al diesel, 200 litros de similares de gasolina, 150 litros de productos leves y gaseosos, y alrededor de 50 kg de pesados.

Estudios recientes en la Universidade de Brasilia con la pirolisis de aceites y grasas condujeron a productos aceptables para sustituir el diesel. Los resultados están mostrados en los cuadros 18 y 19. El cuadro 18 indica los rendimientos en cada rango de destilación mientras que el cuadro 19 presenta algunas propiedades comparadas entre el producto obtenido en la pirolisis y el diesel.

Cuadro 18

## RENDIMIENOS DE PIROLISIS DE ACEITES VEGETALES Y GRASA DE GANADO

Materia prima	Temperatura Pirolisis °C	Rendimiento de la destilación (% masa)			
		< 90 °C	90-140 °C	140-200 °C	> 200 °C
Aceite soya	350 – 400	10	15	15	60
Borra <sup>a</sup> de soya	350 – 400	2	13	27	58
Aceite de palma	330 – 380	7	9	9	75
Aceite de higüerillo	350 – 400	10	10	20	60
Gordura de ganado	350 – 400	4	27	13	46

Fuente: Lima, 2004.

a/ Sedimento espeso aglutinado, material con consistencia gelatinosa.

Cuadro 19

## COMPARACIÓN DE PROPIEDADES: DIESEL Y PRODUCTOS DE PIROLISIS

Característica	Productos de pirolisis materia prima:			Especificaciones para diesel	
	Soya	Palma	Higüerillo		
Aspecto	LII	LII	LII	Limpio y exento de impurezas	
Color ASTM, máx.	2,0	-	-	3,0	
Azufre total (% masa, máx.)	0,007	0,010	0,013	0,20 (2000ppm)	
Destilación (°C)	Pto. Inicial	90,6	63,5	97,5	-
	50% recuperado	265,9	245,2	248,9	245,0 a 310,0
	85% recup., máx.	307,5	254,3	267,6	370,0
	Punto final	344,9	-	297,0	-
Masa específica a 20°C Kg/m <sup>3</sup>	844	818,4	882,3	820 a 880	
Viscosidad a 40°C, cSt(mm <sup>2</sup> /s)	3,5	2,7	3,7	2,5 a 5,5	
Índice de Cetano	50,1	52,7	30,9	45	

Fuente: Soares y otros, 2004.

Se realizaron muchos estudios con la pirolisis de triglicéridos para obtener productos adecuados a los motores diesel (Grossley y otros, 1962, Billaud, 1995). El producto de la pirolisis del aceite de soya presenta baja viscosidad y alto número de cetano cuando se le compara con el aceite crudo, con valores compatibles con el diesel. Los niveles de cenizas y residuos de carbón necesitan ser evaluados.

Dos comentarios finales e importantes: en primer lugar, la cantidad de biocombustible de la pirolisis especificada como diesel es menor que la cantidad de aceite (50% a 75%). En segundo lugar, a pesar de que el producto de la pirolisis es químicamente similar al diesel de petróleo, la remoción del oxígeno durante el proceso de pirolisis elimina los beneficios ambientales de reducción de emisiones de efecto local (monóxido de carbón, hidrocarburos no quemados, humos, partículas).

#### **b) Hidro-tratamiento de aceites crudos y diesel**

Este proceso consiste en adicionar aceite vegetal crudo al diesel que sufrirá el proceso de hidro-tratamiento (HDT) en la refinería de petróleo. Con esto, se incrementa la producción de diesel de bajas concentraciones de azufre. Los detalles de este proceso aún son protegidos en secreto industrial, pero, a grosso modo, los triglicéridos sufren reacción con el hidrógeno produciendo hidrocarburos, propano y agua. El proceso también es interesante por aumentar el número de cetano del diesel tratado en comparación con el tratamiento de diesel sin aceite vegetal.

La Petrobrás (Brasil) creó este proceso en una refinería de petróleo y lo llamó H-Bio, y probaron hasta 20% de aceite de soya en mezcla con el diesel a ser tratado. La Neste Oil de Finlandia creó un proceso similar y lo llamó NExBTL. La primera planta debe entrar en producción en el 2007, la segunda en 2008 y existen proyectos entre la Neste y la Total (Francia) y la OMV (Austria).

Los puntos positivos resaltados para este proceso son:

- La calidad y procedencia de la materia prima posee poca influencia en el proceso.
- No existen residuos a descartar. Los sub-productos van a otros procesos de la refinería.
- El diesel producido es de mejor calidad (Premium).
- No requiere pruebas en motores para su empleo.
- El manejo y almacenamiento son aquellos del diesel común
- La producción de aceites vegetales ayuda a crear empleos en el campo.

A pesar de los aspectos positivos, este proceso, así como la pirolisis, elimina el oxígeno de las moléculas y reduce los efectos positivos de reducción de emisiones de efecto local (monóxido de carbón, hidrocarburos no quemados, humos, partículas) con relación al biodiesel.

## II. EXPERIENCIA INTERNACIONAL CON BIODIESEL

El empleo de biodiesel ha estado creciendo en todo el mundo, como se puede ver en el cuadro 20, adaptado del trabajo de Steenblik (2006) para la OCDE y del EBB (2006). Este crecimiento ocurre de forma diferente en cada país debido a las condiciones económicas locales, las definiciones de políticas públicas, las decisiones acerca de impuestos y tasas, la disponibilidad de tierras y otros factores pueden crear sinergias de diversas intensidades.

Cuadro 20

### ESTIMACIONES DE LA PRODUCCIÓN MUNDIAL DE BIODIESEL (En miles toneladas)

País	2002	2003	2004	2005	2006 <sup>a</sup>
Canadá	1	3	3	43	76
Estados Unidos	50	67	83	250	336
Austria	25	32	57	85	
Rep. Checa	--	--	60	133	
Dinamarca	10	41	70	71	
Francia	366	357	348	492	
Alemania	450	715	1 035	1 669	
Italia	210	273	320	396	
Eslovaquia	--	--	15	78	
España	--	6	13	73	
Suecia	1	1	1	1	
Reino Unido	3	9	9	51	
Polonia	--	--	--	100	
Australia	27	27	29	36	187
Japón	2	2	3	3	3
Brasil	--	--	-	0,7	60,3
China	--	20	45	64	150
India	--	--	--	--	8
Malasia	--	--	--	--	135
Filipinas	--	--	29	29	58
Tailandia	--	--	--	79	100
Otros	--	20	80	348	689
Total	1 153	1 663	2 133	2 880	4 250

Fuente: Steenblik, 2006; EBB, 2006; ANP 2007.

a/ Proyectado; -- cero o despreciable

Entre los países más desarrollados y signatarios del Protocolo de Kyoto, la cuestión ambiental es el factor determinante para el empleo de los biocombustibles en general y del biodiesel como parte de ellos. Países que poseen gran capacidad de producción de oleaginosas también están efectuando esfuerzos para empezar la producción de biodiesel.

## 1. La Unión Europea

El biodiesel ocupa mayor importancia entre los biocombustibles en la Unión Europea, con un *market share* de alrededor del 80% comparado al bioetanol con alrededor del 20% (Von Lampe, 2006). Para el biodiesel, Alemania, Francia e Italia son los mayores productores; para el bioetanol, sobresalen España, Francia, Polonia y Suecia. La Unión Europea lidera el mundo en el desarrollo del biodiesel. Para entender porqué ocurrió esto, es necesario recordar que la Unión Europea está comprometida con el Protocolo de Kyoto, y que algunas políticas agrícolas e energéticas también contribuyeron de forma relevante.

El inicio de la producción de biodiesel en gran escala en Europa viene del año 1993. En 1992, la política agrícola común de la Unión Europea estableció que los agricultores estaban obligados a dejar sin uso parte de sus tierras arables una parte del año sin producir en ellas ni alimentos ni cosechas para fines de forraje (programa *set-aside* de la Common Agricultural Policy). Esta política visualizaba mantener los precios de las cosechas agrícolas y, subsidiariamente conservar el suelo. En estas tierras los agricultores podrían cultivar la soya, el girasol o la colza para fines industriales (óleo química, fluido hidráulico o biodiesel). De esta forma, la producción de aceites vegetales en las tierras del *set-aside* como materias primas para biodiesel se tornó en una buena opción frente al mantenimiento de la tierra sin ningún rendimiento, con lo cual la industria del biodiesel creció rápidamente en los años siguientes.

En la Directiva 2003/30/EC del Parlamento Europeo se estableció una directriz para promover el uso de biocombustibles u otros combustibles renovables para fines de transporte. La meta establecida para los países de la Unión Europea indicaba que el 2% de todo el combustible usado en transportes debería ser de origen renovable en 2005. Para 2010, la meta es de 5,75%. Los Estados miembros de la UE tienen flexibilidad para conducir sus políticas energéticas para atender esta meta y deben reportar en el primero de julio de cada año la situación en que se encuentra la estrategia de implementación de sus medidas concretas. De las 25 naciones de la UE, sólo 15 lograron éxito para la meta de 2005 y existen considerables diferencias entre las estrategias que están en implementación. La Comisión puede proponer al Parlamento que las metas indicativas se vuelvan obligatorias, si los estados miembros no presentan razones aceptables para no cumplir las metas.

Una segunda Directiva del Consejo de la UE (Directive 2003/96/EC) establece las estructuras de tasas para productos energéticos y para la electricidad. Los estados miembros que lo deseen pueden volver a los biocombustibles exentos de las tasas aplicadas a los hidrocarburos. Esta diferenciación tributaria entre biocombustibles e hidrocarburos fue empleada en algunos países con el objeto de impactar positivamente la penetración de los biocombustibles.

En 2005, varios países de la UE25 empezaron a producir biodiesel, no sólo Polonia, que ya está listada en el cuadro 20, sino en Eslovenia, Estonia, Lituania, Letonia, Grecia, Malta, Bélgica, Chipre y Portugal. Actualmente, 20 de las 25 naciones de la EU producen biodiesel.

### a) Alemania

Alemania es hoy el mayor productor de biodiesel del mundo con gran ventaja sobre los demás países, como se indica en el cuadro 20. En Alemania, el Acto de Impuestos sobre Óleos



Minerales fue enmendado en enero de 2004 y garantizó hasta el 2009 la exención total de impuestos y tasas a los biocombustibles para transporte y aceites de calentamiento producidos por biomasa, usados puros o en mezcla con combustibles fósiles. No existían límites cuantitativos para la producción de los biocombustibles. Al principio del año 2005 existían 23 plantas productoras de biodiesel y varios proyectos en construcción (IWR, 2007).

El biodiesel estaba ya exento de tasas desde los años noventa, pero los demás biocombustibles no. Como resultado inmediato de esta política en el 2005 fueron construidas tres plantas de producción de bioetanol.

El cuadro 21 muestra cómo creció la producción y el consumo de biodiesel. En Alemania, se montó una estructura de distribución de biodiesel distinta a todos los demás países: el biodiesel está disponible como B100, es decir puro, en más de 1.500 estaciones de servicio del país. Los consumidores hacen la mezcla que desean con el diesel de petróleo. Como el precio de biodiesel en las estaciones de servicio es más bajo que el del diesel de petróleo, hay gran incentivo a su uso. En el siguiente capítulo se analizará el costo del biodiesel, pero por el momento basta decir que, sin los impuestos o tasas, el precio al consumidor resulta siempre menor que el diesel.

Cuadro 21

CAPACIDAD PRODUCTIVA Y CONSUMO DE BIODIESEL EN ALEMANIA  
(Miles de toneladas)

	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Capacidad de producción	200	460	730	1 100	1 100	2 300
Consumo <sup>a</sup>	340	450	550	800	1 200	1 800

Fuente: UFOP-Union für Förderung von Oel-und Proteinpflanzen, 2006.

a/ Los valores de consumo son un poco diferentes de los indicados por EBB, 2006, (véase el cuadro 20).

En la última sesión del German Bundestag (Parlamento) en 2005 fue aprobada una Ley llamada “Energy Tax Act”, para adecuación al “E.U. Biomass Action Plan” del Parlamento Europeo, también de 2005. En síntesis, las dos leyes se ocupan de la sobre-compensación al biodiesel (y otros biocombustibles) causada por la exención total de tasas frente a los elevados precios del petróleo y sus derivados en ese año.

Entonces, el “Energy Tax Act” aprobó una reducción gradual de los beneficios fiscales para el biodiesel y para los aceites vegetales. En adición, fueron establecidas cuotas para los productores de biodiesel y para los productores y distribuidores de derivados de petróleo: 5% de biodiesel frente al volumen total de diesel y 3% de biocombustibles para la gasolina para el 2006. Para los biocombustibles como un todo, la meta de 5,7% en 2009 y 6% en 2010 (frente a la suma de consumo de diesel y gasolina). Las sanciones en caso de no conformidad (basadas en el contenido energético) son de 16 Euros por GJ para diesel-biodiesel (0,5 Euros por litro), y 28 Euros por GJ para gasolina-bioetanol (0,8 Euros por litro).

Las condiciones necesarias para los privilegios de tasas y de elegibilidad para la obligación de cuotas son que cada biocombustible obedezca las especificaciones técnicas en vigor (EN 14214 para biodiesel, DIN V 5 1606 para aceites vegetales puros y 99% min. de alcohol para el bioetanol).

Las tasas vigentes están en el cuadro 22 hasta el año 2012.

Cuadro 22

LAS NUEVAS TASAS PARA EL BIODIESEL Y ACEITES VEGETALES COMBUSTIBLES

Año	Tasas para biodiesel Euros por litro	Tasas para aceites vegetales Euros por litro
2006 y 2007	0,09	0
2008	0,15	0,10
2009	0,21	0,18
2010	0,27	0,26
2011	0,33	0,33
2012 en adelante	0,45	0,45

Fuente: UFOP, 2006.

Es importante mencionar que en un país donde las cuestiones de la calidad de los productos y de la defensa de los consumidores son avanzadas, hubo problemas. En algunos casos, la calidad del biodiesel B100 no fue adecuada a algunos tipos de vehículos que presentaron problemas de durabilidad. Esto resultó en una reacción de los fabricantes de vehículos que eliminaron la garantía de algunos modelos para el B100. Hoy, existen inventarios públicos de marcas y modelos con garantía asegurada para el uso de hasta B20 ó B100 (por ejemplo, IFEU, 2005). Los consumidores no deben usar contenidos de biodiesel mayores a aquellos indicados en el manual del vehículo para mantener la garantía del fabricante.

## b) Francia

En Francia, los beneficios fiscales no se extienden a toda la producción de biodiesel por que el gobierno establece anualmente la cantidad máxima de producto a ser comercializado con exención de tasas. Los valores de exención también son fijados cada año. Por ejemplo, desde el 2000 hasta el 2003, el volumen aprobado de biodiesel fue de 400.000 toneladas y tenía una exención de EUR 0,35/litro y el bioetanol EUR 0,37/litro, con valor global fijado alrededor de EUR 180 millones para los dos biocombustibles. En el 2004 el volumen aprobado para el biodiesel fue de 800.000 toneladas.

La producción de biodiesel en Francia ocurre en cuatro grandes instalaciones, que centralizan la producción de aceite de colza basadas en cooperativas agrícolas y una asociación de productores: Grand Couronne (260.000 t/año), Compiègne (100.000 t/año), Sète (200.000 t/año) y Boussens (40.000 t/año). La capacidad total en julio de 2006 era de 600.000 t/año; pero a finales de 2008 se prevé triplicar esta capacidad total hasta 1.800.000 t/año. En el sitio de la asociación de productores se indica dónde se situarán las próximas plantas y el año en que empezarán a operar.

En el 2005 fue creada una nueva tasa sobre actividades que producen contaminación ambiental, pero los distribuidores de hidrocarburos que usen biocombustibles en sus mezclas pueden deducir esta tasa de acuerdo con una fórmula progresiva que depende del volumen de biocombustibles comercializados. Esto es un incentivo más para la distribución de mezclas de hidrocarburos con biocombustibles.

El 2005 un Decreto introdujo un sistema de tasas, llamado “bonus-malus”, un incentivo de 0,33 Euro por litro para el biodiesel y de 0,37 Euro por litro para el bioetanol, pero combinados con una penalidad para empresas que no comercialicen la cantidad mínima de biocombustibles (0,60 Euro por litro no comercializado). El aceite vegetal crudo utilizado como combustible está completamente exento de tasas.

Las cuotas por año fueron definidas en dos fases: 2005-2009 y 2008-2013. Para la primera fase (2005-2009) las cuotas por año son:

- Biodiesel: 599.000 toneladas (fase 1) y 700.000 toneladas (fase 2)
- ETBE: 40.000 toneladas (fase 1)
- Bioetanol: 275.000 toneladas (fase 1) y 250.000 toneladas (fase 2)

En particular, para el año 2006 se definieron 677.000 toneladas de biodiesel y 307.000 toneladas de bioetanol (incluyendo el empleado para producir el ETBE).

La distribución del biodiesel en Francia se hace en mezclas de 5% con el diesel de petróleo, como está determinado en el reglamento (*Arrête du 23 Décembre 1999 modifié*). Para vehículos de flotas que poseen almacenamiento propio y bajo contrato con el distribuidor o productor, se puede emplear hasta el 30%. Caso contrario a Alemania, no es decisión de los consumidores la definición de la mezcla a usar. Como dato curioso, Francia emplea el nombre de “Diester”, patentado, para el biodiesel.

### c) **Italia**

La producción de biodiesel en 2005 fue de 396.000 toneladas distribuidas en nueve plantas productoras para una capacidad instalada de producir hasta 827.000 toneladas. El gobierno delimita cada año la cantidad de biodiesel que puede beneficiarse de exenciones completas de tasas. Para los años 2002 a 2004 el límite fue establecido en 300.000 toneladas; para el 2006 la cuota fue reducida a 200.000 toneladas.

Los privilegios de tasas inciden solamente hasta las cantidades máximas definidas para cada año. Para el bioetanol, existe una reducción de tasas de 0,28 Euro por litro (tasa de la gasolina: 0,54 Euro por litro). El ETBE también tiene una reducción similar al etanol, de 0,28673 Euros por litro. Para bioetanol y ETBE no existen cuotas sino un valor máximo anual de pérdida de recaudación determinada por los incentivos. En 2006 este límite fue de EUR 11.911.000.

En Italia, el biodiesel se comercializa como B7, es decir, 7% de biodiesel en mezcla con diesel de petróleo.

**d) Austria**

En Austria existe una exención de tasas para biocombustibles puros y reducciones de tasas para mezclas con al menos 4,4% de biocombustibles. Frente a los precios internacionales del petróleo, en octubre de 2005 el país redujo las tasas de diesel de petróleo de 0,325 a 0,297 Euros por litro. La reducción para gasolina, de 0,445 a 0,412 Euros por litro deberá ocurrir en octubre de 2007 para mezclas con 4,4% de bioetanol. En octubre de 2005 también se creó la “obligatoriedad de sustitución” de 2,5% de biocombustibles con relación al total de derivados de petróleo que cada empresa comercializó. En octubre de 2007 el porcentaje será de 4,3% y en 2008 de 5,75%. El monitoreo de los índices de sustitución estará a cargo del Ministerio del Ambiente.

**e) España**

En España, la mezcla de biodiesel con diesel es fijada en 5% (B5). La producción de biodiesel ganó importancia a partir 2004 y especialmente en el 2005. Para introducir los objetivos de la Directiva 2003/30/EC, el gobierno de España aprobó el “Plan de Energías Renovables (PER) para el período de 2005–2015. Las metas son de 7% de biocombustibles en 2010 y de 10% en 2015. El programa para energía renovable aprobado por el gobierno establece una meta de 2,2 millones de tep en energías renovables hasta el 2010 que se puede comparar con el valor de 0,2 millones de tep en 2004.

El país ya es el líder en la producción de bioetanol en la UE. El gobierno concede exenciones completas de tasas para los biocombustibles puros y proporcionalmente para las mezclas.

**f) Suecia**

El país posee una política de incentivos a los biocombustibles. En Estocolmo, los autobuses usan bioetanol por motivos ambientales. El gobierno concede exenciones de tasas a todos los biocombustibles y su meta alcanzó el 3% de biocombustibles en 2005.

Para el biodiesel, todavía existen restricciones técnicas por parte de los mayores fabricantes de vehículos diesel (Volvo y Scania) para uso de biodiesel en cantidades superiores a 5% (B5). La mayor barrera es el propio clima frío, que causa dificultades técnicas para el biodiesel (punto de enturbamiento). El biodiesel producido con aceites vegetales usados sólo puede ser empleado en el verano, de otra forma requerirían aditivos de alto costo.

**g) Polonia**

El gobierno aprobó en el 2004 una Ley de Biocombustibles con exenciones parciales de tasas para la producción de bioetanol para mezclar en la gasolina y para la producción de biodiesel para mezclar en el diesel. La reducción de las tasas depende del porcentaje de la mezcla y es definida cada año. En el caso del biodiesel, su producción comenzó de cero en 2004 para aumentar sorpresivamente a 100.000 toneladas en 2005.

## **h) Otros países de la Unión Europea**

Otros países de la Unión Europea tienen programas de apoyo a los biocombustibles con diversos grados de penetración. Bélgica, Reino Unido, Repúblicas Checa y Eslovaca, Irlanda, Eslovenia y Portugal poseen algún tipo de beneficio fiscal en curso. Otros países, como Chipre, Luxemburgo, Malta y Holanda no poseen ningún beneficio fiscal para biocombustibles.

Dos países tienen posiciones muy particulares, Dinamarca y Finlandia. Dinamarca considera que los costos del apoyo a los combustibles renovables son muy altos frente a sus beneficios con relación a la cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> reducidas y por lo tanto, no se prevé ninguna acción fiscal futura para la promoción de los biocombustibles. Finlandia no aplica beneficios fiscales para los biocombustibles pues considera que su clima y suelo no permitirían producción de biodiesel o bioetanol en gran escala. El país todavía emplea mucha biomasa para fines de calentamiento, provenientes del manejo de bosques y ya tiene un buen desempeño ambiental (pero no en el sector de transporte).

## **2. El biodiesel en Estados Unidos, Canadá, Australia y Japón**

### **a) Estados Unidos**

En los Estados Unidos el empleo de biocombustibles está centrado en el bioetanol producido de maíz que es adoptado en mezclas con gasolina. El bioetanol reemplaza el uso de MTBE como aditivo para oxigenar la gasolina. Existen incentivos fiscales federales para el etanol así como incentivos en estados productores de maíz desde el año 1978 (Energy Tax Act) que todavía cambian de valor a través de los años.

Para el biodiesel, en el 2004 se creó un crédito de US\$ 1,00 por galón (B100), si es producido de aceites vírgenes y de US\$ 0,50 si es producido de aceites de cocina reciclados. Las mezclas B20 ó B5 obtienen créditos proporcionales. El crédito es efectuado para los mezcladores (en general distribuidores mayoristas) que deben pasar parte del beneficio a los consumidores, reduciendo los precios a los usuarios. Otra parte de los créditos deberán ser empleados en inversiones en la infraestructura de distribución.

El Departamento de Agricultura (USDA) creó el Programa “Commodity Credit Corporation” que hace pagos a los productores de biocombustibles (alcohol y biodiesel) que hayan incrementado su producción. Por cada 2,5 de unidades excedentes con relación al año anterior, se paga 1 unidad (productores hasta 65 millones de galones); para productores arriba de 65 millones de galones por año, la proporción es de 3,5 para 1. El monto total para cada año fiscal es de alrededor de US\$ 180 millones.

Existe también una variedad de incentivos por parte de los estados productores de soya, el aceite virgen más usado para producir biodiesel, cuya producción se muestra en el cuadro 23. Es evidente el incentivo producido por el crédito tributario y otros beneficios introducidos a partir de 2004.

Cuadro 23

PRODUCCIÓN DE BIODIESEL EN LOS ESTADOS UNIDOS  
(Miles de toneladas)

Año	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Producción	6,6	16,5	50,0	66,0	82,5	248

Fuente: NBB, 2006.

Existen actualmente en los Estados Unidos 87 empresas productoras de biodiesel con una capacidad de producción de hasta 1.900 toneladas por año. De éstas, 14 son acreditadas por el National Biodiesel Board con certificación BQ9000 para la calidad del biodiesel producido. La capacidad instalada aún es mucho mayor que lo ofrecido por el mercado real. Para los próximos tres años existe la previsión de más de 65 plantas nuevas y 13 expansiones, con perspectiva de alcanzar hasta 4.620.000 toneladas de capacidad de producción.

El biodiesel es un combustible y un aditivo para el diesel que necesita estar registrado con la EPA (U.S. Environmental Protection Agency) y su comercialización debe ser precedida por el registro. El programa de la EPA llamado “Clean School Bus” ofrece hasta US\$ 7 millones para ayudar a las comunidades a reducir las emisiones contaminantes y a promover el uso de biodiesel (B20 o mayor) es elegible.

La penetración del biodiesel en Estados Unidos ocurre básicamente en nichos de mercado, en flotas que poseen sistemas de almacenamiento propio y que usualmente trabajan con el B20 (20% de biodiesel en diesel), como autobuses, servicios postales y órganos de gobierno. Este porcentaje es el mínimo para atender al Energy Policy Act de 1992 que determina una cantidad mínima de vehículos empleando combustibles alternativos (AFV) en flotas de servicios públicos o del gobierno. Por cada cinco vehículos B20 la flota puede contabilizar un vehículo AFV obligatorio. Otra alternativa es realizar una adquisición de 450 galones de biodiesel (B100), que es acreditada como la adquisición de un vehículo AFV. El mayor consumidor de biodiesel es el Departamento de Defensa (USDOE, 2006) y se estima que alrededor del 75% de todas las adquisiciones de vehículos AFV son provenientes de las diferentes áreas de gobierno (no sólo biodiesel).

En el año 2005 el Congreso aprobó el “Energy Policy Act 2005”. Esta ley establece metas de volúmenes de combustibles renovables por año que deben ser cumplidas por las refinerías, *blenders* o importadores. En caso de que la meta no sea atendida, la diferencia pasa al año siguiente y se torna obligatoria. Los refinadores e importadores pueden negociar sus “créditos” excedentes.

El biodiesel es considerado también un “Diesel Premium” para motores empleados en actividades mineras y para embarcaciones. El uso de B2 (2% de biodiesel) es permitido para aumentar la lubricidad del diesel de ultra bajo contenido de azufre.

En los Estados Unidos, el biodiesel presenta precios al consumidor mayores que el diesel de petróleo (véase adelante, comparación de precios), por lo que su penetración en el mercado no es tan grande como en Alemania.

## **b) Canadá**

El gobierno federal estableció una meta para el país en el cuadro de compromisos de abatimiento de gases de efecto invernadero del Protocolo de Kyoto. Para esta meta, en el año 2010 el 35% de la gasolina deberá ser reemplazada por el E10 (es decir, 10% de bioetanol) y 500 millones de litros de biodiesel deberán ser producidos y consumidos. Para el bioetanol, hasta CAN\$ 118 millones (US\$ 102 millones) serán invertidos por el gobierno en 11 proyectos. Los incentivos fiscales para los biocombustibles son de CAN\$ 0,10 (US 0,087) por litro de bioetanol y de CAN\$ 0,04 (US\$ 0,035) por litro de biodiesel. Varias provincias ofrecen exenciones de tasas de uso de carreteras y tres provincias aprobaron leyes locales obligatorias para el uso de mezclas con biocombustibles, posterior a la disparidad de los productos.

Actualmente existen algunos pequeños productores de biodiesel a partir de aceites usados en escala sub-comercial y cuatro productores de biodiesel de capacidades medianas o grandes: Ocean Nutrition, que trabaja con aceites de pescados provenientes del proceso de extracción de ácidos grasos Omega 3 y posee capacidad de producir hasta 6.000 toneladas anuales de biodiesel de origen animal; La Milligan Bio Technologies que tiene capacidad de hasta 4.000 toneladas de biodiesel de canola; la Rothsay con hasta 65 mil toneladas de grasas de ganado, canola y soya; y la BIOX, con capacidad para hasta 55.000 toneladas.

Un problema a superar para el aumento del uso de biodiesel es causado por las bajas temperaturas ambientes en Canadá y las propiedades de escurrimiento del biodiesel en esas condiciones.

## **c) Australia**

En el 2000 el gobierno federal exentó el bioetanol de las tasas de combustibles hasta US\$ 0,21 por litro y fijó como meta que 1% ó al menos 350 millones de litros del total de combustible sean de alcohol producido con recursos naturales hasta el año 2010. El gobierno apoyó dos proyectos de bioetanol. En 2002, el gobierno cambió la forma de incentivo, con la desaparición de las exenciones de tasas y creación de subsidio directo a los productores de bioetanol con el mismo valor (US\$ 0,21 / litro). En el 2004, este subsidio fue extendido hasta el año de 2011. El uso de bioetanol es en mezcla de hasta 10% en la gasolina (con aviso a los consumidores) o hasta 5% sin necesidad de aviso.

En el 2003 el Ministro del Ambiente y Herencia firmó las especificaciones de calidad para el biodiesel así como los mecanismos que el gobierno usará para hacer las verificaciones de conformidad (IFQC, 2003). Dos fechas estaban previstas para las especificaciones: septiembre de 2004 (especificaciones para contenido de azufre más blandas) y enero de 2006 (especificaciones para azufre más restrictas).

El gobierno apoyó dos proyectos de bioetanol en el cuadro de compromisos que, en ese entonces, se tenía previsto para Australia con el programa de abatimiento de gases de efecto

invernadero, para cumplir el Protocolo de Kyoto, mientras el Gobierno y el Parlamento definían su posición de apoyo o no al Protocolo. Australia todavía no ha ratificado el Protocolo de Kyoto.

#### **d) Japón**

El gobierno de Japón permitió la comercialización de mezclas de hasta 3% de bioetanol con gasolina. En el ámbito de los compromisos del Protocolo de Kyoto, el país tiene como meta usar 500 millones de litros de combustibles derivados de biomasa hasta el 2010.

En la actualidad, Japón posee alrededor de 35 pequeños productores de biodiesel que emplean aceites usados como materia prima, de los cuales cinco tienen capacidad de producir más de 1.000 litros por día y sólo una capacidad de más de 10.000 litros. La producción es muy pequeña y debe ser vista como acción ambiental de reciclar el aceite usado y no como acciones de introducción comercial de biodiesel. Un factor a considerar es que, caso contrario a muchos otros países, Japón no es capaz de usar los dos beneficios típicos de productores de biodiesel: reducir las importaciones de petróleo y aumentar la producción agrícola. El país no tiene capacidad de auto-alimentarse de biocombustibles y depende de importaciones de Malasia (biodiesel) o Brasil (bioetanol).

### **3. Los países no-OECD de Asia: India, China, Malasia, Tailandia e Indonesia**

#### **a) India**

En diciembre de 2001, el gobierno de India lanzó un programa piloto para probar la viabilidad de mezclas de etanol y gasolina como forma de absorber excedentes de azúcar y mejorar el empleo de la capacidad de producción de las destilerías. En el 2002, fue aprobada la comercialización de mezclas E5% (5% de etanol en gasolina). En 2003, el gobierno introdujo una exención de US\$ 0,02 por litro de ventas de etanol, aunque la formación de precios de etanol en India es aún afectada por diferencias de tasas entre los estados.

Las actividades en el campo del biodiesel en India están aún centradas en Universidades e Institutos de investigación, utilizando siempre aceites no-comestibles obtenidos de oleaginosas locales y, principalmente, el piñón (*Jatropha Curcas*) y “Karanja” (*Pongamia pinatta*). Se creó una misión gubernamental para explorar los aspectos principales de la cadena del biodiesel: etapa agrícola, obtención de semillas seleccionadas, extracción del aceite, producción del biodiesel, mezcla y comercialización e investigación y desarrollo. La meta central es el desarrollo de la economía rural y la generación de empleos.

Se están llevando a cabo varios ensayos de campo sobre el uso del biodiesel en autobuses, vehículos, tractores y locomotivas con mezclas que varían del B5 hasta el B100. La empresa Indian Oil está trabajando en el establecimiento de parámetros de especificación de calidad para biodiesel de piñón y han realizado ensayos en su centro de investigación. Una planta en escala de laboratorio con capacidad de producir 100 kg/día de biodiesel ya está en uso y la empresa está proyectando plantas de mayor capacidad.



Se encuentran ya en producción comercial dos pequeñas plantas, una de 1.000 litros/día, y otra de 450 litros/día usando el piñón. Proyectos de mayor capacidad para 30 a 90 toneladas por día aún no fueron construidos porque no existe la producción de piñón necesaria. El área de plantación del piñón ya es de alrededor de 10.000 ha, pero el cultivo necesita de cuatro a cinco años para ganar productividad y las primeras semillas fueron destinadas al aumento del plantío y no para la obtención de aceite.

La expectativa para India es que el biodiesel de piñón pueda crear empleos y usar vastas extensiones de tierras no adecuadas para otros cultivos agrícolas. Existen políticas de apoyo a los campesinos pobres para el cultivo del piñón (*Jatropha*).

En India existe el gran desafío de incrementar la producción de alimentos, reducir las emisiones de contaminantes por los vehículos y reducir la necesidad de petróleo. Para ello, el programa de biocombustibles debe ser conducido de forma tal que no comprometa la seguridad de la producción de alimentos (Glueck, 2005). Esto explica la opción por cultivos no comestibles y que no requieran tierras de buena calidad.

En octubre de 2005, el Ministerio de Petróleo y Gas Natural de India anunció la política de adquisición de biodiesel, válida para enero de 2006: el sector público de compañías de petróleo debe comprar biodiesel B100, a US\$ 0,56, para hacer mezcla B5 (5%). El biodiesel debe cumplir las normas de calidad del Buró Indio de Estándares.

## **b) China**

El etanol en mezcla con la gasolina está en uso experimental y busca crear un nuevo mercado para los excedentes de maíz y reducir la demanda por petróleo importado, causada por el elevado crecimiento de la economía china. Existen subsidios del estado para cuatro plantas de etanol. Usos de mezclas de 10% de alcohol en gasolina ya estaban en curso en cinco ciudades de dos provincias en el 2003 y en el 2005 más de 27 ciudades de 8 provincias fueron incluidas en el programa.

Como forma de minimizar el consumo de derivados de petróleo China estableció un padrón de consumo máximo de combustible para los vehículos con la fase 1 empezando en 2005 y la fase 2 empezando en 2008. El consumo máximo está vinculado al peso del vehículo.

Con el aumento de los precios de petróleo y las altas tasas de crecimiento de la economía china, la industria del biodiesel se debe desarrollar con rapidez en los próximos años. Hasta el momento, la materia prima para producción de biodiesel es el aceite usado, pero con el aumento de la producción prevista serían necesarias otras materias primas. Los grandes fabricantes de plantas de biodiesel, como Lurgi, ya están implementando proyectos en el país.

Las empresas de gran tamaño que ya producían biodiesel en 2005 eran la Fujian Zuoyue New Energy Co.Ltd, con capacidad de hasta 20.000 toneladas por año y 50.000 toneladas por año en construcción, la Sichuan Gusan Biodiesel Co.Ltd con la misma capacidad y misma expansión para el año de 2006, y la Hainan Zhenghe Biodiesel Co.Ltd con 10.000 t/año (Zhenhong, 2005).

A pesar del apoyo declarado del gobierno para el biodiesel, el desarrollo del bioetanol es prioritario y hasta ahora no existen regulaciones especiales o beneficios fiscales para el biodiesel. Los productores usan como estándar de calidad, la antigua norma DIN E 51606 FAME de Alemania, pero deben adoptar a corto plazo la norma europea EN 14241.

### **c) Malasia**

A pesar de ser un país exportador de petróleo y gas natural, el país también es el mayor productor de aceite de palma en el mundo. El uso local del biodiesel puede ayudar a reducir el costo de los subsidios para las ventas por menor de los derivados de petróleo.

El gobierno creó un programa de producción de biodiesel con el aceite de palma. La primera fábrica fue puesta en marcha en 2004. Los problemas con el biodiesel producido de aceite de palma están asociados a sus propiedades a bajas temperaturas: el alto valor del punto de enturbamiento (15°C) y del punto de obstrucción de filtros (15°C). Debido a esto, sólo en temperaturas ambientes superiores a 20°C el biodiesel podrá ser empleado sin ser calentado. Para superar este problema, los productores de biodiesel desarrollaron una versión de bajo punto de fluidez (LPPPD Low Pour Point Palm Biodiesel) donde los puntos de enturbamiento y de obstrucción de filtros es menor que 0°C. Las demás propiedades del biodiesel de palma atienden tanto a la norma ASTM de los Estados Unidos como la norma europea EN14214.

Para uso local, el “aceite de palma procesado” (Foon y otros, 2005) que no es biodiesel, esta siendo probado en mezclas de 2% a 5% con diesel, pero no hay mayores esclarecimientos sobre el tipo de procesamiento empleado ni sobre los efectos de largo plazo en la durabilidad de los motores.

En Malasia, la mezcla B5 (5% de biodiesel) deberá ser universal a partir del 2008. Los productores de aceite de palma también pretenden que la producción de biodiesel posibilite exportaciones para Europa y Japón.

### **d) Tailandia**

El gobierno de Tailandia mostró interés en introducir un programa de gran escala de producción de alcohol desde el 2002 con el objetivo de disminuir los impactos de la creciente importación de petróleo y derivados y sustituir el MTBE por alcohol para aumento de octanaje y oxigenación de la gasolina. La meta es la comercialización de mezclas de hasta 10% de alcohol en la gasolina y para lo cual el gobierno concedió exenciones de tasas para etanol, concesión de inversiones empleando los fondos estatales de Hidrocarburos y de Conservación de Energía, exenciones de aranceles sobre máquinas y ocho años de exención fiscal a los productores.

Para el biodiesel, el gobierno definió una meta de participación de 3% de biodiesel hasta el 2011. La empresa de petróleo de Tailandia, la PTT, anunció que el año 2007 empezará a comercializar el B5. El Comité de Promoción y Desarrollo de Biodiesel aprobó un presupuesto de alrededor de US\$ 31 millones para la promoción del biodiesel en el período 2005-2012.

**e) Indonesia**

El país tiene como meta el uso del 2% de biodiesel hasta el 2010 y 5% hasta el 2025. La oleaginosa escogida es la palma aceitera. Indonesia es el segundo mayor exportador de aceite de palma y debe convertirse en el primero en pocos años. El país también es un gran exportador de petróleo y gas natural y hasta ahora no hay incentivos fiscales para biocombustibles.

**4. Países de América Latina**

**a) Brasil**

Brasil es el país que posee la mayor producción de biocombustibles con gran predominio del bioetanol de caña de azúcar. En los años setenta el país estableció el “Proálcool”, con el objetivo de sustituir el petróleo importado e implantó el uso de bioetanol combustible. Hoy, se comercializa el bioetanol “puro” (etanol hidratado, 93,4%) y el etanol anhidro (99,4% min.) mezclado en toda gasolina de uso en vehículos en porcentajes entre 20% y 25%, dependiendo de la oferta de alcohol. El etanol posee exenciones fiscales frente a la gasolina. La comercialización de vehículos “flex-fuel, que empezó en el 2002, permite que el consumidor escoja el combustible que le de más ventajas: alcohol o gasolina.

Desde finales de los años setenta, el Instituto Nacional de Tecnología (INT) empezó a probar aceites vegetales en motores diesel visualizando su sustitución. En la Universidad Federal de Ceará (UFC) empezaron las pruebas con biodiesel. En 1980, el gobierno creó un programa llamado “Prodiesel” para coordinar los trabajos usando aceites vegetales en motores diesel. Fueron probados aceites vegetales puros en diferentes mezclas con el diesel en motores. Se encontraron problemas de uso de aceites puros en motores diesel. En 1983 un nuevo programa de gobierno, llamado OVEG (Óleos Vegetales) trabajó con mezclas de hasta 30% de aceites vegetales en diesel, mezclas de 20% de aceite vegetal con 7% de etanol y 73% de diesel y biodiesel (mono-alquil ésteres de aceites vegetales) B100 y B30.

Desde el punto de vista técnico, las mezclas de aceites vegetales con diesel no fueron aprobadas para amplia comercialización por problemas en los motores de inyección directa (la mayoría de la flota). Mezclas de hasta 30% de aceite vegetal en diesel eran aceptables para motores de inyección indirecta. Las mezclas empleando etanol y aceites vegetales con diesel no presentaron mejores resultados. Hubo mejora de la viscosidad de la mezcla aunque tuvieron otros problemas. Las pruebas con biodiesel presentaron los mejores resultados aunque con problemas de dilución de aceite lubricante y compatibilidad con algunos materiales (B100 y B30). Pudieron ser empleados porcentajes menores de biodiesel pero los precios de petróleo empezaron a disminuir y la viabilidad económica, que ya era discutible, desapareció. El programa terminó en 1985 (Lima 2004).

En el año 2000 volvió a ser considerado el uso de biodiesel, ahora con otras motivaciones además de la sustitución de importaciones. Algunas iniciativas de trabajos se desarrollaron en Universidades y, en el 2001 el biodiesel pasa ser una de las prioridades del “Ministerio de Ciencia y Tecnología”.

El gobierno crea un Programa de Biodiesel en 2003, con los siguientes objetivos:

- Introducir de forma sostenible un nuevo combustible renovable.
- Diversificar la matriz energética.
- Reducir las importaciones de petróleo y diesel.
- Crear empleos y renta en la agricultura.
- Mantener y fijar las familias en el campo.
- Aprovechar suelos no adecuados para producción de alimentos.
- Hacer disponible un combustible mejor desde el punto de vista ambiental.

La formalización del programa de biodiesel en Brasil es a través de la Ley 11.097 de 13 de enero 2005 que establece porcentajes mínimos obligatorios de 2% de biodiesel en el diesel a partir del 2008 y de 5% a partir del 2013. En esta ley, las atribuciones de la Agencia Nacional do Petróleo (ANP) son extendidas para abarcar también los biocombustibles en general, llamándose ahora “Agencia Nacional do Petróleo, Gas Natural e Biocombustíveis”.

Las definiciones de las exenciones fiscales y cómo y cuándo aplicarlas se encuentran en la Ley 11.116 de 19 de mayo 2005. Existe exención total de los tributos federales para algunas materias primas, algunos tipos de producción y algunas regiones del país. La ley establece el concepto de “combustible social” que trae beneficios fiscales para la producción de biodiesel que esté basada en la agricultura familiar (pequeños productores de oleaginosas). Una cuestión aún no resuelta es la aplicación de las tasas estatales (similares al IVA) que pueden ayudar o dificultar la penetración del biodiesel en varios estados (provincias) de Brasil (Lovatelli 2006). Mayores detalles con respecto a costos y exenciones de tasas se presentan en el próximo capítulo.

Como Brasil es un gran productor de bioetanol, la ruta ética para producción de biodiesel sería la más adecuada. La ruta metélica emplea metanol producido de gas natural o petróleo (fuentes fósiles) y el país importa este producto. Por lo tanto, sea por motivos ambientales o por reducción de importaciones, es importante que los problemas con la ruta ética sean resueltos.

Las materias primas más indicadas para la agricultura familiar y fijación de las poblaciones campesinas son el higüerillo y la palma, que aún no poseen volúmenes de producción adecuados. La soya si posee volumen de producción adecuado pero es mecanizada (pocos empleos) y es producida en tierras buenas para agricultura. Para incentivar a los pequeños productores a cultivar el higüerillo en tierras pobres el gobierno aportó alrededor de US\$ 42 millones en préstamos.

En septiembre de 2005 (CNPE, 2005) el gobierno autorizó la introducción obligatoria del 2% de biodiesel a partir de enero 2006 para el producto producido de acuerdo con el llamado “sello social”, es decir, para el biodiesel producido por la agricultura familiar certificada por el “Ministerio de Desenvolvimento Agrário”. Los productores de diesel tendrían de adquirir el biodiesel con sello social a partir de remates públicos por el menor precio ofrecido por los productores catastrados.

El primer remate público se produjo en noviembre de 2005 y fueron adquiridos 70 millones de litros de biodiesel para ser entregados hasta junio de 2006. El segundo remate

público ocurrió en marzo de 2006 para entregarlos entre julio de 2006 y junio de 2007 por un volumen total de 170 millones de litros. El tercer remate público se hizo en julio de 2006 y fueron rematados 50 millones de litros. El cuarto remate público, en la misma fecha que el tercero, fue destinado a proyectos aún por ser construidos (oferta virtual) y fueron rematados 550 millones de litros.

El objetivo de los remates públicos es anticipar la penetración del biodiesel para incentivar las inversiones en la agricultura y en las plantas productoras. Para obtener el porcentaje obligatorio de 2% a partir de 2008 se estima una cantidad necesaria alrededor de 800 millones de litros anuales. Los remates públicos señalan a los inversionistas la seguridad de la adquisición, por parte de los mayoristas de derivados de petróleo, del biodiesel producido antes de 2008.

Hasta noviembre de 2006, existían 19 plantas de biodiesel autorizadas por la ANP, asociadas a 10 grupos empresariales con una capacidad instalada de alrededor de 640 millones de litros anuales, es decir, casi lo necesario a partir de enero 2008. La producción total de biodiesel en el 2006 fue alrededor de 68,5 millones de litros (cerca de 60,3 miles toneladas).

#### **b) Argentina**

El Decreto 1396/2001 crea el “Plan de competitividad para el combustible biodiesel” y trae otras provisiones. Mediante este plan los productores de biodiesel son exonerados de varios tributos por 10 años (Lovatelli, 2001). La Resolución 120/2001 definió las especificaciones técnicas del producto. Las exenciones son de US\$ 0,15 por litro de biodiesel, que equivale al 100% de la carga fiscal de diesel de petróleo.

Actualmente, existen 10 plantas productoras de biodiesel en Argentina con una capacidad total de alrededor de 60.000 toneladas por año. Existen flotas de vehículos realizando pruebas con biodiesel en Buenos Aires. Una ley que define el uso mandatorio de B5 está en discusión en el Congreso, pero no aún no ha sido concluida. En Argentina, la materia prima para el biodiesel es la soya que el país produce y exporta en gran cantidad.

#### **c) México**

La información más consistente sobre las perspectivas de uso del biodiesel en México se encuentra en un estudio de factibilidad conducido por la GTZ y el BID (Thrän y otros, 2006). En resumen, el estudio alerta el hecho que México aún importa la mayoría de sus semillas oleaginosas por lo que en caso de una mayor producción nacional de semillas deberán ser aprovechadas en la producción de aceites comestibles. El estudio no recomienda el subsidio del gobierno para la producción de semillas para biodiesel para evitar las amenazas de desabastecimiento de semillas para producción de aceite comestible (el dilema “¿granos o combustibles?”). De la misma forma, los precios diferenciados según el uso para productos tipo “commodities”, tienden a crear un mercado negro.

Sin embargo, con el apoyo de la industria extractora y refinadora de aceites comestibles, una aliada y colaboradora natural de un programa de biodiesel, se podrá avanzar en el uso de

biodiesel utilizando semillas u otras materias primas que no sean competidoras de las semillas comestibles.

Con relación a exenciones fiscales, el estudio resalta que “hoy el biodiesel no está sujeto a impuestos (dado que la legislación actual en la materia se refiere explícitamente a los hidrocarburos)”, pero esta situación debe ser regularizada: si el deseo es mantener las exenciones de impuestos de combustibles para el biodiesel, esto debe hacerse de forma explícita y detallada, con los valores de la exención y el plazo de validez de estas determinaciones.

Actualmente México cuenta con una planta de producción comercial de biodiesel de la empresa Grupos Energéticos, inaugurada en julio de 2005 y con capacidad de producción de alrededor de 3.000 toneladas de biodiesel por año. La materia prima empleada es grasa de ganado con porcentajes de ácidos grasos debajo del 3%.

#### **d) Colombia**

Colombia empezó un programa de uso de biodiesel y está cumpliendo las etapas previstas por la Unidad de Planeación Minero Energética del Ministerio de Minas y Energía. En septiembre de 2005 se completó la regulación de calidad para el producto (especificaciones técnicas). Las definiciones gubernamentales para señales de precios se concluyeron en diciembre de 2005. El desarrollo de pruebas estuvo previsto para el período julio de 2005 y julio de 2006, con caracterización de mezclas, pruebas en laboratorio y ruta. El reglamento de la logística estaba previsto para junio de 2006. Los ajustes finales de la regulación están previstos para julio de 2007 y el inicio del programa en fase comercial en junio de 2008. En Colombia se usará el aceite de palma para producir el biodiesel y se están ampliando las plantaciones para ello.

#### **e) Países de Centroamérica**

Los países de Centroamérica, objeto de este informe, son tratados en sus secciones correspondientes.

### III. ESTIMACIONES DE COSTOS Y PRECIOS PARA EL BIODIESEL

Este capítulo trata los costos para el biodiesel, considerando los costos de inversión, de las materias primas, del biodiesel producido y de la formación de precios hasta el consumidor, incluyendo los mecanismos de compensación o de obligatoriedad. Se muestran las diferentes características de formación de costos para el biodiesel de algunos de los países donde ya se está produciendo en gran escala y al final de este capítulo se analizan comparaciones entre los costos o precios del biodiesel y el diesel.

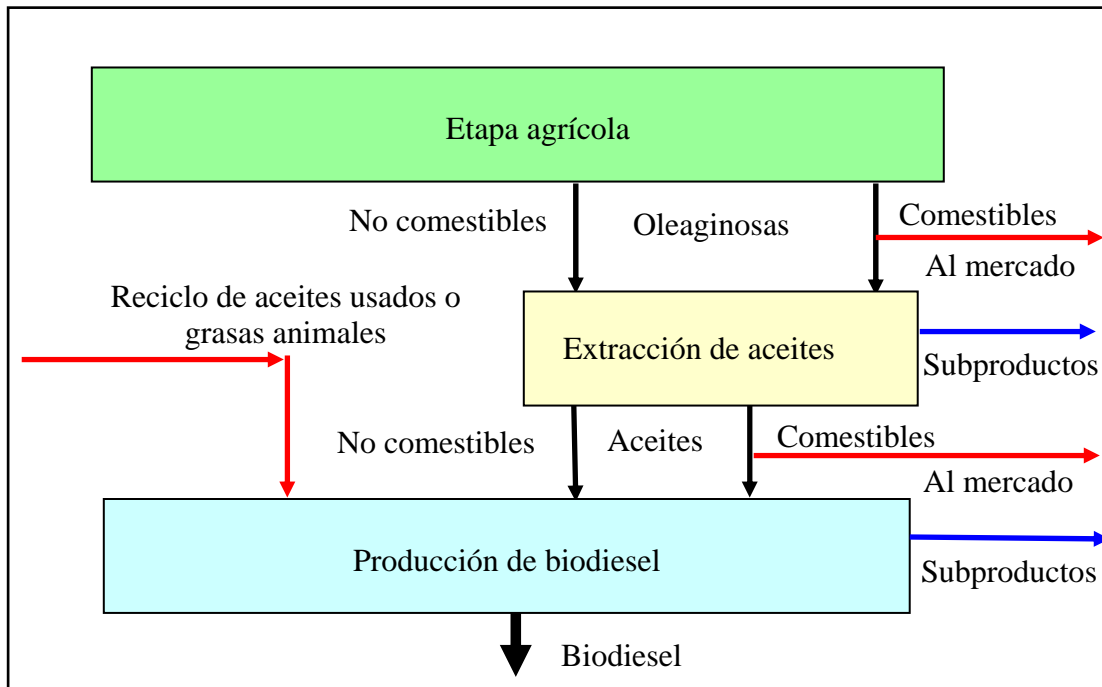
La experiencia internacional indica que los costos más importantes de producción de biodiesel están en los precios (o costos) de la materia prima básica, es decir, el aceite o grasa. Al hablar de costos o precios de biodiesel, se debe inicialmente discutir los costos y precios de las oleaginosas, después de los aceites y grasas y finalmente cómo impacta esto en los costos de producción y precios mínimos del biodiesel.

La figura 10 presenta los flujos de materias primas desde la etapa agrícola hasta la producción del biodiesel. Los productos de la etapa agrícola son las oleaginosas (semillas o frutos) que pueden ser comestibles (maíz, arroz, soya, maní y ajonjolí) o no comestibles (como frutos de palma, tempate, higüerillo, colza). En el caso de ser comestibles, la producción de aceite debe competir con el consumo directo alimenticio. A su vez, las oleaginosas no comestibles pueden producir aceites comestibles (colza, palma) o no comestibles (tempate, higüerillo). Aquí también existe una competencia entre la producción de biodiesel y el consumo alimenticio de los aceites comestibles. Además, la producción de biodiesel puede emplear materias primas alternativas como aceites usados u otras grasas recicladas.

La estructura productiva, por otro lado, puede tener diversos grados de integración: producción aislada de biodiesel, o producción integrada de aceites y biodiesel, o aún integración completa desde la etapa agrícola hasta la producción del biodiesel. En cada caso, las condiciones de análisis de costo de producción del biodiesel son diversas.

Figura 10

**COMPETENCIA ENTRE USOS ALIMENTICIOS O NO ALIMENTICIOS**



Fuente: Elaboración propia

## 1. Costos y precios de materias primas para el biodiesel

### a) Costos de producción de oleaginosas

Los costos de producción de oleaginosas son relevantes para estructuras verticales integradas de producción donde un mismo grupo económico se ocupa desde la siembra de la oleaginosa (etapa agrícola) hasta la elaboración del biodiesel. En este caso, los márgenes comerciales en la etapa agrícola no son tan importantes porque se pueden distribuir a lo largo de las demás etapas.

El examen detallado de la formación de costos de producción de las oleaginosas debe tener en cuenta los costos locales de donde se establecerán las plantaciones. No es objetivo de este trabajo hacer tales estudios detallados. Los valores que serán considerados fueron obtenidos de literatura para diversos países y deben ser tomados tan solo como referencias iniciales. Para cada proyecto particular se deben tener en cuenta los costos de la tierra en la región (adquisición o arrendamiento, como sea el caso), los costos de insumos agrícolas, mano de obra para las tareas específicas del manejo desde la siembra hasta la cosecha, el calendario agrícola y sus impactos sobre costos (eventuales efectos estacionales), la productividad promedia esperada para el lugar, el contenido de aceite en la oleaginosa (de acuerdo a la variedad escogida), los costos de almacenamiento y de flete de transporte hasta la planta extractora, los tributos o tasas agrícolas, etc.



Para hacer estimaciones del costo de producción para biodiesel producido en diversas partes del país con diversas oleaginosas se hicieron estimaciones detalladas de los costos de materias primas oleaginosas en Brasil (CEPEA, 2005), que condujeron a los rangos de valores presentes en el cuadro 24. Las diferencias de costos para una misma oleaginosa tienen en cuenta variaciones regionales de costos y productividad agrícola en el país.

Cuadro 24

## COSTOS DE OLEAGINOSAS EN BRASIL

	Costo de semillas (US\$/ton)	
Soya (grano)	167 mínimo	250 máximo
Girasol (semillas)	167 mínimo	258 máximo
Algodón (semillas)	75 mínimo	85 máximo
Maní (con cáscara)	357 promedio	
Palma (frutos con racimos)	55 promedio	
Higüerillo (semillas)	248 promedio	

Fuente: CEPEA, 2006.

Otros valores para costos de la palma se pueden obtener del sitio de Fedepalma (Colombia) estimados en 2004, de US\$ 66 a US\$ 68 por tonelada de frutos. Macedo y Nogueira (2005) relatan costos de producción de higüerillo informados por EMBRAPA en alrededor de R\$ 0,50/kg de semillas (US\$ 200/ton).

En India, se estimó en US\$ 105/ton los costos de producción de semillas de *Jatropha* (PCRA, 2004) pero estos son datos de proyecto y no confirmados. No se obtuvieron otros datos de costos agrícolas de oleaginosas.

## b) Precios de mercado de oleaginosas

Los precios de mercado de las oleaginosas son relevantes para estructuras integradas de extracción de aceite y producción de biodiesel. La empresa debe realizar adquisiciones de materias primas en el mercado de oleaginosas, haciendo competencia con las demandas del mercado alimenticio en muchos casos.

El cuadro 25 presenta los precios internacionales, en los principales mercados, para el maíz, la soya y la canola. Es importante tener en cuenta que el maíz y la soya en grano pueden servir al mercado de alimentos directamente. La canola debe ser usada para extracción de aceite y producción de harina o torta. En este periodo, los precios estuvieron muy volátiles y con tendencia de elevación a largo plazo.

Cuadro 25

## PRECIOS INTERNACIONALES DE OLEAGINOSAS, 2005 A SEPTIEMBRE 2006

Oleaginosa	Local – condición	Precio max. US\$ / ton	Precio min. US\$ / ton	Precio sep.2006 US\$ / ton
Maíz amar.	FOB Golfo USA	121	87	121
Maíz	Chicago	148	137	137
Soya amar.	FOB Golfo USA	269	218	223
Soya	Róterdam	399	390	399
Soya	Chicago	258	240	258
Soya	China	382	342	382
Soya	Tokio – transgenica	295	247	295
Soya	Tokio – normal	362	301	313
Canola	Winnipeg – Canadá	340	321	340

Fuente: Von Lampe, 2006.

### c) Costos de producción de aceites y grasas vegetales

El cuadro 26 indica los costos de producción de algunos aceites vegetales en varios países (Kaltner, 2005). Para llegar a los costos de producción del aceite se debe tener en cuenta los precios de los frutos o semillas y los costos industriales de extracción del aceite. Según Fedepalma (Colombia), los costos de los frutos de palma corresponden a un 90% del total mientras que los costos industriales a un 10%. Más adelante se presentarán costos de extracción para las diferentes oleaginosas.

Una información interesante para los países de Centroamérica fue también obtenida de Kaltner (2005), los costos de producción por tonelada de aceite de palma como función de la edad de las plantas (véase el cuadro 27). Con esto, las empresas integradas pueden estimar sus costos de producción de aceite tomando en cuenta los años de implementación de cada una de las fincas productoras de frutos. Es de notar que el costo del aceite está cerca de su valor mínimo para fincas entre 10 y 20 años de edad. Para fincas muy recientes, la productividad es tan baja que el aceite producido por ellas es muy caro. Cuando las fincas se vuelven viejas (20 a 25 años), su productividad empieza a caer y el costo del aceite empieza a subir.

Cuadro 26

## COSTOS DE PRODUCCIÓN DE ACEITES VEGETALES

Aceites	País	Costo promedio US\$/ton	Precio de mercado promedio US\$/ton
Soya	USA	450	440
	Brasil	215	
	Argentina	215	
	China	405	
Palma	Indonesia	165	410
	Malasia	225	
	Brasil	250	
	Guatemala <sup>a</sup>	200 – 300	
	Costa Rica <sup>a</sup>	200 – 300	
Higüerillo	Colombia <sup>b</sup>	352 – 360	1 000
	Brasil	600	
	Brasil <sup>c</sup>	430 – 570	
Jatropha	India <sup>d</sup>	345 – 390	

Fuentes: Kaltner, 2005; a/ Información personal; b/ Fedepalma, 2004; c/ Macedo & Nogueira, 2005; d/ PCRA, 2004.

Cuadro 27

## COSTO DEL ACEITE DE PALMA EN FUNCIÓN DE LA EDAD DE LAS FINCAS

Año de implementación	Costo del aceite US\$/ton
1 a 4	Sin producción
5	650
6	400
7	240
8	190
9	180
10 hasta 20	170
21	175
22	180
23	190
24	200
25	220

Fuente: Kaltner, 2005.

#### d) Precios de mercado de aceites vegetales y grasas animales

Los precios de mercado de aceites o grasas son relevantes para plantas aisladas de producción de biodiesel. Las empresas productoras de biodiesel deben hacer adquisiciones de materias primas en el mercado de aceites o grasas vegetales haciendo competencia con los mercados de alimentos y de usos industriales, entre ellos la producción de biodiesel. El Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA) estimó que en el 2006 los usos industriales consumieron alrededor del 16,5% de los aceites y grasas disponibles en el mundo, mientras que el uso alimenticio fue de 83,5%. La serie histórica presenta un incremento de la participación de usos industriales de aceites, que en el 2000 consumieron sólo el 10,5%.

El cuadro 28 presenta precios internacionales de algunos aceites y grasas vegetales, de acuerdo con los locales donde son comercializados. Los precios de aceites en el mercado internacional presentan volatilidad elevada como se puede ver en los gráficos 2, 3 y 4 (Reca, 2005; Booth y otros, 2005; USDA, 2006). Las tendencias de elevación o de baja de las cotizaciones en el mercado internacional se aplican simultáneamente a todos los aceites y grasas, incluyendo las grasas animales. Esto ocurre por que existe una gran capacidad de sustitución de un aceite por otro en la gran mayoría de los empleos. Los aceites hacen competencia de usos y de precios.

El análisis de los gráficos muestra que para todos los aceites y grasas las variaciones de precios son grandes y el 2001 fue el año de menores precios. Existen aceites de más alto valor de mercado presentados en el gráfico 2, arbitrariamente definidos como aquellos que, en algún momento de la serie de datos, pasaron los US\$ 700/ton. El aceite de maní se destaca de los demás con precios consistentemente elevados. Los otros aceites en ese gráfico son de colza, copra, girasol y algodón. El aceite de girasol tenía comportamiento y precios muy similares al aceite de soya, pero en los últimos años su precio se elevó drásticamente.

Cuadro 28

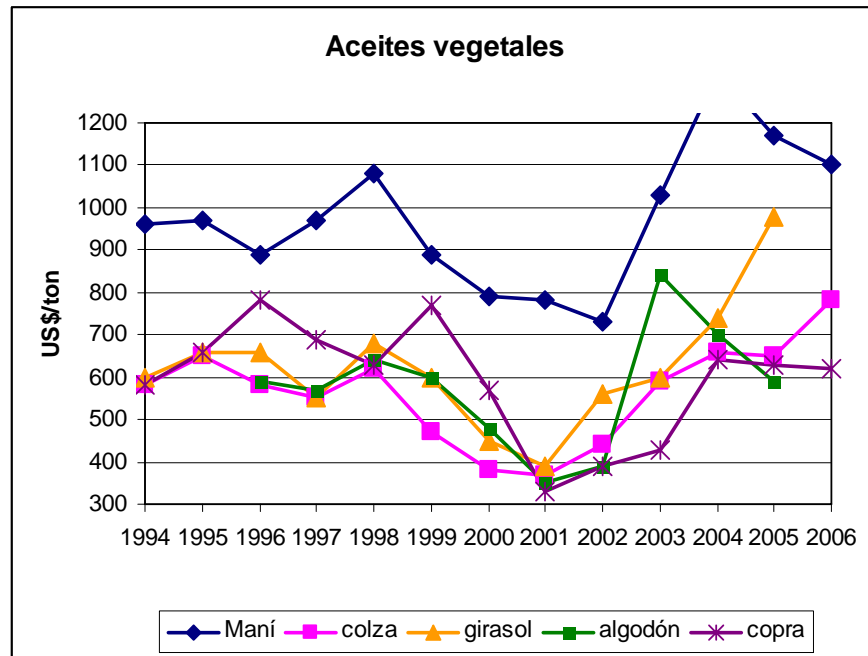
## PRECIOS INTERNACIONALES DE ACEITES, 2005 A SEPTIEMBRE 2006

Aceite	Local – condición	Precio máximo US\$ / ton	Precio mínimo US\$ / ton	Precio sep.2006 US\$ / ton
Soya crudo	FOB Buenos Aires	517	427	517
Soya	Róterdam	731	707	731
Soya	Chicago	659	625	659
Girasol	Róterdam	760	720	760
Canola	Róterdam	867	855	855
Maní	Róterdam	1 175	1 175	1 175
Palma	Róterdam	585	557	585
Palma kernel	Róterdam	590	590	590
Palma	FOB Malasia	435	410	423
Palma kernel	FOB Malasia	610	605	610
Copra crudo	Róterdam	600	590	600

Fuentes: Palmoil.com, 2006.

Gráfico 2

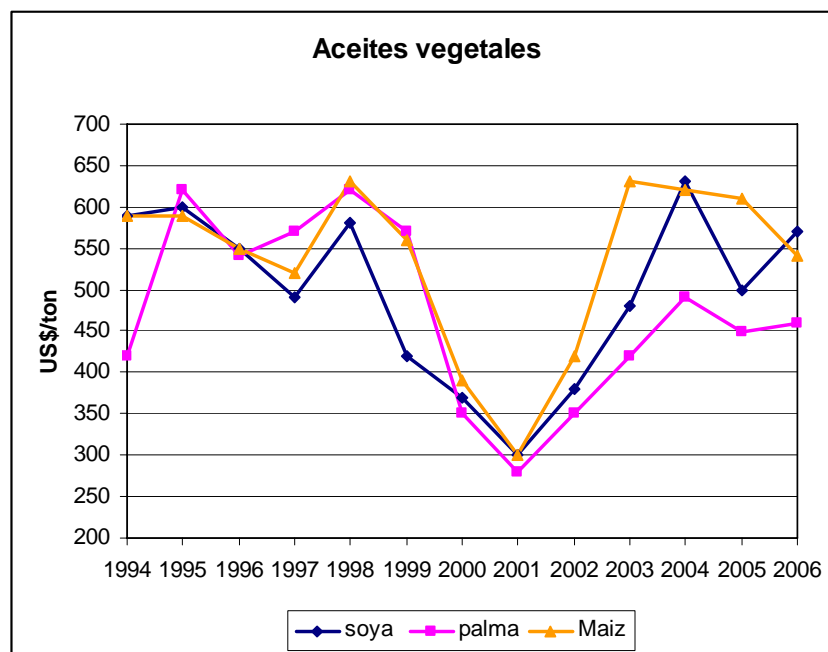
## EVOLUCIÓN DE PRECIOS – ACEITES DE ALTO VALOR



Fuente: Rabobank Reca, A., 2005; Booth y otros, 2005; USDA, 2006; Phillipine Coconut Authority, 2006; Austrian Biofuels Institute, 2006

Gráfico 3

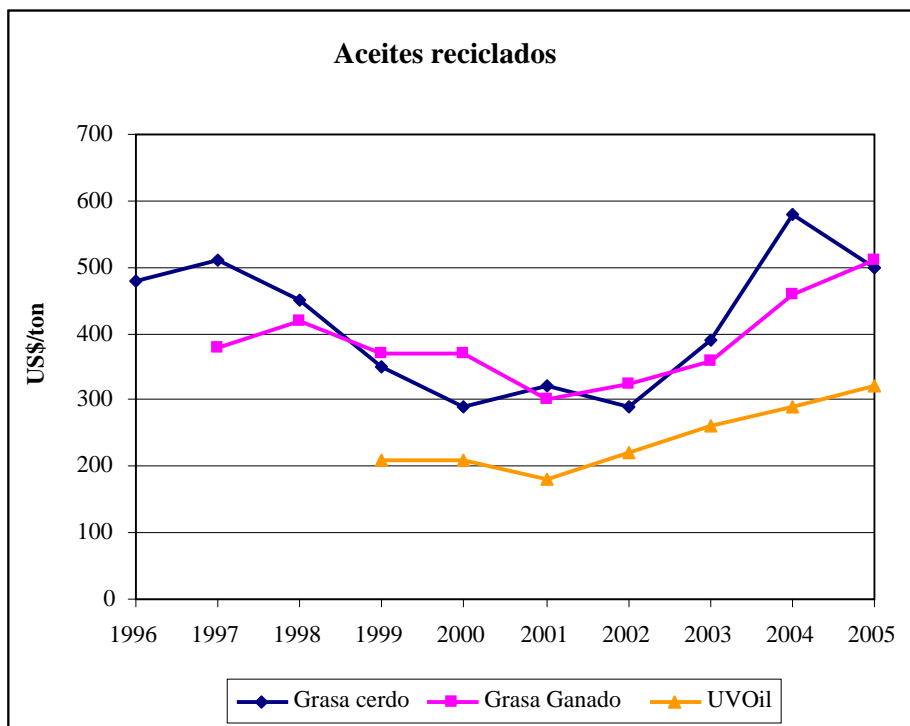
## EVOLUCIÓN DE PRECIOS – ACEITES DE VALOR INTERMEDIARIO



Fuente: Rabobank Reca, A., 2005; Booth y otros, 2005; USDA, 2006; Phillipine Coconut Authority, 2006; Austrian Biofuels Institute, 2006

Gráfico 4

## EVOLUCIÓN DE PRECIOS – ACEITES USADOS Y GRASA ANIMAL



Fuente: Rabobank Reca, A., 2005; Booth y otros, 2005; USDA, 2006; Phillipine Coconut Authority, 2006; Austrian Biofuels Institute, 2006

El gráfico 3 presenta los aceites de precios intermedios, de soya, de palma y de maíz. Estos aceites poseen un comportamiento de evolución de precios muy similar. En general, el aceite de maíz posee precios un poco más elevados que los otros y los aceites de soya y de palma se disputan por los menores precios. No es casualidad que los mayores volúmenes de aceites vegetales comercializados son de soya y de palma.

El gráfico 4 presenta los precios de grasas animales (cerdo y ganado) y de aceite vegetal usado (reciclado). Son los mejores precios como materias primas para el biodiesel pero no poseen composición y calidad constantes, lo que obliga a un tratamiento previo a la transesterificación.

Aún no existen precios de mercado para el aceite de piñón (*Jatropha*). El aceite de higüerillo es otra opción de materia prima para biodiesel apta para siembra en tierras de menor calidad. El aceite de higüerillo, posee un mercado alrededor de 400.000 toneladas anuales y posee precios muy elevados. Datos de una serie histórica de precios para los años noventa (valores mensuales de 1989 hasta 1997) sitúan los precios entre US\$ 780 y US\$ 1.100 por tonelada. No se obtuvo una serie histórica más reciente, pero todas las referencias que tratan de precios de aceite de higüerillo (castor oil) ponen un precio de US\$ 800 por tonelada como precio mínimo de mercado.

Una evaluación de febrero de 2006 realizada por la Comisión Europea (European Comisión, 2006) sobre el mercado de aceites vegetales indica que la tendencia de aumento de

producción y de consumo deben continuar en los próximos años. El crecimiento de la comercialización de los aceites fue consistentemente mayor que el crecimiento de las oleaginosas y de las tortas debido al aumento del uso industrial de los aceites vegetales, incluyendo la producción de biodiesel. Las proyecciones del trabajo apuntan a un aumento en la participación del aceite de palma (con dos tercios del mercado internacional suplidos por Malasia e Indonesia). Debido a una fuerte demanda, las proyecciones son para una tendencia de aumento de precios de los aceites vegetales en los próximos diez años.

Cuando se analiza el control societario sobre las plantas de extracción de aceites vegetales, se puede constatar que existe una gran concentración en el mercado de extracción, en particular en la Unión Europea y en los Estados Unidos. Según Reza (2005) tres empresas multinacionales dominan el 83% del mercado de extracción de aceites vegetales en la Unión Europea y sólo 17% son producidos por productores locales independientes. En los Estados Unidos, las mismas tres empresas dominan un 74% del mercado restando a otros productores el 16%. Para Brasil, las empresas multinacionales dominan alrededor de 46% del mercado (39% las tres anteriormente mencionadas). Algo similar ocurre en Argentina donde el 52% del mercado de extracción es dominado por empresas multinacionales. En China, los productores locales tienen alrededor de 88% del mercado y las grandes multinacionales un 12%. El poder de mercado de algunas grandes empresas extractoras de aceites puede dificultar el ingreso de nuevos agentes en este mercado, especialmente en coyunturas donde los márgenes comerciales estén bajos.

## **2. Costos de producción de biodiesel**

### **a) Costos de inversión en la planta de biodiesel**

Las plantas de biodiesel pueden ser de diferentes capacidades. Los países que ya poseen gran producción comercial de biodiesel poseen plantas de capacidad industrial, mientras que los países que aún están haciendo evaluaciones sobre las posibilidades de desarrollar producción en gran escala, poseen en general plantas piloto o de pequeña capacidad. Como en general existe el efecto de escala para los costos de inversión, la información está dividida en dos categorías según la capacidad de las instalaciones.

Es necesario tener claro que las inversiones presentadas adelante se refieren a los equipos de la planta, y no incluyen, por ejemplo, las inversiones en adquisiciones de suelo, construcciones civiles, tanques de almacenaje, laboratorios, oficinas administrativas, costos de implementación del proyecto, licencias ambientales y otros costos administrativos.

### **b) Inversiones en plantas de pequeña capacidad**

Para plantas de pequeña capacidad los datos son más escasos y dependen de los sistemas incluidos: tipo de tratamiento del aceite antes de la reacción, tratamiento o no de la glicerina, recuperación o no de metanol y de aguas para purificación del biodiesel, etc.

Gran parte de las instalaciones de pequeña capacidad fueron construidas especialmente para cada proyecto y no corresponden a tamaños estándar o modulares, sino producidas de forma

artesanal. Es evidente que este tipo de instalación posee alto costo por unidad de biodiesel producido.

Existen todavía pocos productores comerciales de pequeñas plantas modulares, con producción por bateada o continua. Para ellos no se cuenta con información sobre el tratamiento de la glicerina y de otros efluentes ni sobre la calidad del biodiesel. En el cuadro 29 se muestran algunos costos de inversión de sistemas con estas características.

Cuadro 29

## COSTOS DE INVERSIÓN: PLANTAS DE PEQUEÑA CAPACIDAD

Fabricante	Modelo – tipo	Capacidad Ton / año	Inversión <sup>a</sup> US\$ mil	Inversión por ton US\$ / ton/año
Flowtech	M4 – bateada	105	25 <sup>b</sup>	238
	M8 – bateada	210	30 <sup>b</sup>	143
	M20 – bateada	530	50 <sup>b</sup>	95
	C15 – continuo	4000	450 <sup>b</sup>	113
BioDieselTech	CPU 500 – con	3600	1300	361 <sup>c</sup>
NREL estimado	Bateada	1760	920	522

Fuente: Sitios de Internet de las empresas.

a/ No incluyen costos de proyecto, construcción, de suelo, etc.

b/ No incluyen tanques, separadores de metanol, glicerina bruta (60%)

c/ Glicerina 90% sin efluentes.

### c) Inversiones en plantas de gran capacidad

Con respecto a plantas de gran capacidad, algunos valores de costos de inversión se encuentran en el análisis de plantas o proyectos y están en un rango de inversiones por capacidad (dólares por tonelada de biodiesel por año) más confiable. En proyectos de mayor capacidad las condiciones operacionales (número de horas por día) son más claras, así como la calidad de la glicerina obtenida, el grado de recuperación del metanol en exceso, la calidad del biodiesel producido y el manejo de efluentes.

Los costos de inversión pueden incluir la planta de producción de aceite. En estos casos, los costos de inversión serán mayores, pero los costos de producción serán menores. El cuadro 30 muestra algunos datos de instalaciones de gran capacidad construidas en varios países y estimaciones de instituciones gubernamentales.

Estimaciones de Fortenbery (2005) indican que los costos de la planta de transesterificación constituyen alrededor del 65% de las inversiones totales, que toman en cuenta la adquisición de tierras, tanques de almacenamiento, obras civiles, construcción, mano de obra y otros costos variados.



Cuadro 30

## COSTO DE INVERSIÓN: PLANTAS DE GRAN CAPACIDAD

Instalación	País	Capacidad Ton / año	Inversión <sup>a</sup> US\$ mil	Inversión/ton/año US\$ / ton/año
AleSat	Brasil	100 000	61 000	610 <sup>b</sup>
Ecodiesel	Brasil	105 000	33 000	314
Granol	Brasil	100 000	30 500	305
USDA estimación	EUA	100 000	32 000	320
NREL estimación	EUA	100 000	34 000	340
Lurgi	Alemania	60 000	10 000	167
Lurgi	Alemania	120 000	15 000	125
Fortenbery, 2005	USA	33 000	5 500	167
S&T <sup>2</sup> , 2004	Canadá	56 700	13 500	238
Saville, 2004	Canadá	38 000	12 900	366
Indian Oil	India	20 000	6 600 a 8 800	330 a 440

a/ No incluyen costos de proyecto, construcción, de suelo, etc.

b/ Incluye la planta de producción de aceite.

#### d) Costos de materias primas: metanol y etanol

A pesar de que el metanol puede ser producido de materias primas renovables, esto no es lo más común, el metanol obtenido de gas natural o de procesos petroquímicos es el que domina el mercado debido a sus costos de producción más bajos. Por su origen fósil, su empleo disminuye el apelo ambiental del biodiesel. El metanol es el alcohol más empleado en la reacción de transesterificación. El mercado internacional de metanol puso precios de alrededor de US\$ 500 por tonelada en 2007. Los precios del metanol están elevados porque los precios del petróleo y del gas natural también están muy altos. En el 2001 los precios estaban cerca de los US\$ 150, subieron a US\$ 280 en 2004 y llegaron hasta US\$ 600 en noviembre de 2006 (Methanex, 2007). Esto ocasiona impactos sobre los costos de producción del biodiesel.

El etanol anhidro –producido con la caña de azúcar– es el producto con mayor apelo ambiental para la producción de biodiesel, pero sus precios y las dificultades técnicas en el proceso de transesterificación (discutidas en el capítulo I) aún constituyen barreras para su empleo. Los precios del etanol anhidro en Brasil en los dos últimos años oscilaron entre US\$ 450 y US\$ 600 por tonelada (CEPEA, site). Los precios del etanol anhidro en los Estados Unidos están en el rango de US\$ 680 hasta US\$ 920 (AFI, 2007).

#### e) Costos operacionales de producción de Biodiesel

Para empresas productoras de biodiesel integradas desde la etapa agrícola, el costo importante es el costo de la materia prima oleaginosa sobre el cual se suman los costos de extracción de aceite y de producción de biodiesel. Para plantas combinadas de extracción de aceite y producción de biodiesel son los precios de mercado de las oleaginosas que cuentan; para plantas exclusivas de producción de biodiesel son los precios de mercado del aceite o de las grasas animales los que son fundamentales.

Los costos y precios de oleaginosas y aceites vegetales fueron ya discutidos anteriormente. Según las referencias consultadas, el costo de las materias primas constituye desde el 75% hasta el 85% de los costos totales de producción de biodiesel. Los costos indirectos (de inversión, administrativos, mano de obra) constituyen el segundo rubro de costos en un rango entre el 10% y el 15%. Según el NREL, el costo de capital amortizado para una planta de gran capacidad incrementa el costo del biodiesel producido en algo como US\$ 35 por tonelada de producto. Los costos del alcohol y del catalizador para el proceso responden por 2% hasta 3% (metanol). Otros costos, como energía eléctrica y calor, son pequeños.

La producción del biodiesel emplea energía eléctrica y calor de proceso. Aunque los costos de estas utilidades no sean significativos, deben ser tomados en cuenta en una evaluación económica detallada. NREL estima estos costos en alrededor de US\$ 20 por tonelada de biodiesel.

La mano de obra asociada a la producción del biodiesel es pequeña, pocos trabajadores y técnicos conducen la producción de grandes plantas de biodiesel. El peso de este rubro en los costos no es elevado.

Otros costos que deben ser considerados para análisis más detallados son manutención, seguros, transporte de materias primas y productos, mercadeo, manejo de desechos, etc.

Las plantas integradas de producción de biodiesel pueden ser muy convenientes cuando la escala de producción es grande y existen oleaginosas disponibles con facilidad. Las instalaciones de extracción de aceite y de producción de biodiesel pueden compartir instalaciones, el procesamiento del aceite no tiene que ser tan completo como para fines alimenticios y toda la logística de transporte y almacenamiento es menor.

En los casos de plantas integradas, los costos de extracción de aceite deben ser calculadas; según el CEPEA (2005), los costos típicos de extracción de aceite son de US\$ 10 por tonelada de granos de soya, US\$ 18 por tonelada de semillas de algodón, US\$ 14 por tonelada de semillas de girasol, US\$ 20 por tonelada de granos de maní, US\$ 48 por tonelada de semillas de higüerillo (estimado) y de US\$ 48 por tonelada de frutos de palma (estimado). La Fedepalma (2004) de Colombia presenta datos reales de costos de extracción de aceite de palma que varían entre US\$ 31 y US\$ 40 por tonelada de frutos. Datos de India indican un costo de extracción para la *Jatropha* alrededor de US\$ 52 por tonelada de aceite producido.

Estimaciones de costos operacionales totales para la etapa de transesterificación (sin los costos de aceites) realizadas por CEPEA (2005) para condiciones de Brasil indican costos totales (por tonelada de biodiesel producido) en el rango de US\$ 54 a US\$ 111, con los menores valores para plantas de mayor capacidad y los mayores valores para plantas pequeñas (efecto de escala). Estimaciones realizadas en India ponen los costos de operación de la planta de biodiesel (sin costos de materias primas) en US\$ 148 por tonelada de biodiesel producido.

#### **f) La formación del costo de la etapa de transesterificación en detalle**

Los costos de la etapa industrial de transesterificación fueron evaluados por Fortenbery (2005) para condiciones de los Estados Unidos usando como materia prima el aceite de soya a

precios de mercado. Los resultados se presentan en el cuadro 31. Cada rubro de costo fue detallado en el trabajo citado y las hipótesis empleadas fueron explicadas. La planta analizada tenía capacidad para 100.000 toneladas de biodiesel por año. Es importante observar que el costo final no es afectado por posibles créditos de venta de subproductos.

Cuadro 31

## COSTOS DE PRODUCCIÓN DE BIODIESEL

Costos de producción	US\$ / galón	US\$ / tonelada
Metanol	0,1176	35,303
Catalizador NaOH	0,0320	9,606
Utilidades (agua, vapor, electricidad)	0,0552	16,571
Mano de obra (16 personas)	0,0600	18,012
Manutención, seguros, etc.	0,0730	21,914
Depreciación del capital	0,0635	19,062
Transporte de materias primas	0,0480	14,409
Costos sin materias primas	0,4493	134,88
Materias primas	1,3600	408,27
Costo total	1,8093	543,15
Materias primas / total		75,2%

Fuente: Fortenbery, 2005

**g) Reducciones de costos debidas a co-productos**

Los subproductos del proceso de producción dependen del grado de integración de la planta. Para una planta industrial de biodiesel sin integración, el principal subproducto es la glicerina. En caso de que la planta sea integrada en las etapas industriales, además de la glicerina, la torta o harina producida en el proceso de extracción del aceite constituye un subproducto muy importante. Para casos de integración total los desechos agrícolas (racimos, ramas, hojas, cáscaras, etc.) también pueden ser valorados como abono natural, alimento para animales o servir para generación de energía para los procesos industriales. No existen precios de mercado para tales residuos agrícolas.

Cuando la planta incluye la extracción de aceite, la torta generada en este proceso puede ser comercializada para alimentación animal o humana, en particular si posee proteínas, como el caso de la soya. Los desechos de extracción de aceite pueden ser usados para fines energéticos o como abono, si no tienen mejor empleo.

Existen precios de mercado para las tortas o harinas producidas en la extracción de aceite de muchas especies. El caso más común es el de la soya donde la torta posee cotización en bolsas de mercancías (commodities). El cuadro 32 presenta los precios promedios de harinas de oleaginosas en el período de octubre de 2005 hasta septiembre de 2006. En Brasil, los precios locales de tortas y harinas de oleaginosas son marcados por los precios de la harina de soya. Para el segundo semestre del 2005 los precios de la torta de algodón estaban alrededor de US\$ 110, de maní en US\$ 145, de girasol en US\$ 125 y de soya en US\$ 200. Aunque no sean comercializadas las tortas de palma y de higüerillo se estimaban en US\$ 44 y US\$ 110 respectivamente (CEPEA, 2005).

Cuadro 32

PRECIOS INTERNACIONALES DE HARINAS DE OLEAGINOSAS  
 Octubre 2005 - septiembre 2006

Harina	Local - condición	Precio máx. US\$ / ton	Precio min. US\$ / ton	Precio sep.2006 US\$ / ton
Harina soya	Chicago	217	202	217
Harina soya	Dalian China	295	277	295
Pellets soya	Róterdam	236	226	226
Pellets girasol	Róterdam	148	140	140
Harina canola	Róterdam	164	152	152
Pellets maíz	Róterdam	175	166	175

Fuente: Abiove, 2007

En el proceso de producción de biodiesel, el principal subproducto es la glicerina bruta. La composición de la fase de glicerina obtenida en la producción de biodiesel es muy variable y depende de características del proceso. El contenido de glicerina puede variar de 40% a 90%, con valores típicos de alrededor del 65%. La cantidad de agua puede variar desde 8% hasta 50%. El contenido de metanol debe ser menor que el 0,5% y el contenido de sales puede llegar hasta el 10%. Para bajos contenidos de glicerina o para contenidos de metanol elevados, la comercialización puede no ser posible.

Dependiendo del proceso de transesterificación y del tipo de separación de alcohol que se emplea, la glicerina puede ser comercializada o no. A partir de porcentajes de glicerina arriba del 80% y de la ausencia de metanol (< 0,5%), es posible comercializar este subproducto generando ingresos y reduciendo los costos del biodiesel. Instalaciones de gran capacidad en general poseen equipos para purificación de glicerina, para obtenerla en grados de contenido mejores hasta el grado farmacéutico (pureza > 99,7%) y lograr mercados y precios más convenientes.

La glicerina puede ser una solución o un problema, por un lado, los ingresos de comercialización de glicerina pueden ser importantes para bajar los costos de producción del biodiesel. Por otro lado, las inversiones para purificarla pueden ser elevadas y sus precios de mercado vienen bajando, en parte por causa del aumento de oferta que acompaña el aumento de producción de biodiesel en el mundo. Finalmente, si la glicerina es muy impura o no tiene mercado se convierte en un desecho no aprovechable que generará costos de manejo y no ingresos.

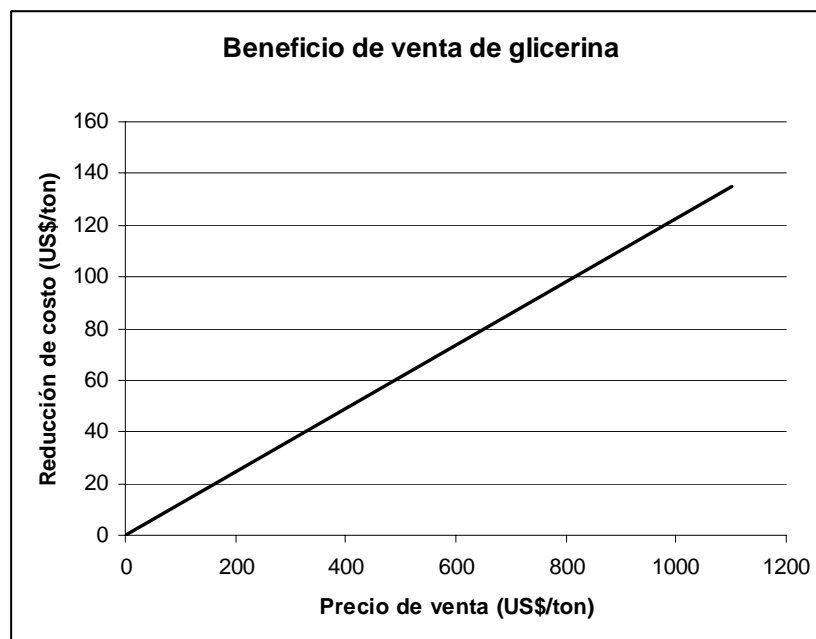
Los precios de la glicerina tienen una tendencia de baja en los últimos años, especialmente en Europa, que se atribuye a una mayor disponibilidad del producto asociada a los volúmenes de biodiesel producidos. La glicerina refinada tenía precios superiores a US\$ 1.500 por tonelada toda la década de los noventa, hasta 1997. Los precios entonces cayeron a un rango entre US\$ 1.100 y US 1.300 hasta el 2005, cuando cayeron una vez más (Maneely, 2006). Para el 7 de junio de 2006, los precios de la glicerina en los mercados de Asia-Pacífico estaban en el rango de US\$ 560 hasta US\$ 620 por tonelada, en el rango de US\$ 550 hasta US\$ 620 en Europa y en los Estados Unidos en el rango de US\$ 750 hasta US\$ 840. (ICIS, 2006).

Los ingresos obtenidos con la glicerina pueden reducir el costo final del biodiesel. Estimaciones hechas por Maneely (2006) están en la gráfico 5. Se debe notar que para los precios

actuales de la glicerina, de alrededor de US\$ 600 a US\$ 800 por tonelada, las reducciones de costo para el biodiesel están en el rango de US\$ 73/ton hasta US\$ 98/ton (es decir, de US\$ 0,064/litro hasta US\$ 0,086/litro).

Gráfico 5

### REDUCCIÓN DE COSTO DEL BODIESEL POR VENTA DE GLICERINA



Fuente: Elaboración propia.

#### h) El costo total de producción del biodiesel

Para evaluar el costo final del biodiesel es necesario definir cual es el tipo de instalación, integrada desde la etapa agrícola, integrada en la etapa industrial (extracción y transesterificación) o sin integración (el productor de biodiesel hace adquisiciones en el mercado de aceites y grasas).

Muchas estimaciones han sido presentadas por diversos autores. Tomando en cuenta un rendimiento del 40% de aceite por semilla y que el costo de extracción de aceite y producción de biodiesel es cerca del 20% del total, el costo de producción del biodiesel de higüerillo estaría alrededor de US\$ 625/ton (ó US\$ 0,55/litro), sin tomar en cuenta los beneficios de venta de subproductos (Macedo y Nogueira, 2004). Tomando el precio del mercado internacional del aceite de higüerillo (US\$ 741 / ton), el costo del biodiesel de higüerillo estaría cerca de de US\$ 926/ton (o US\$ 0,815/ litro).

Estimaciones del CEPEA (2005) para condiciones brasileñas y empleando por hipótesis el etanol condujeron a costos para el biodiesel de soya en el rango de US\$ 0,42 hasta US\$ 0,51 por litro, dependiendo de la región de producción de la soya. Para el biodiesel de girasol, entre US\$

0,37 y US\$ 0,47; para el biodiesel de palma un valor de US\$ 0,36; para el biodiesel de maní de US\$ 0,44; para el biodiesel de algodón de US\$ 0,39 y para el biodiesel de higüerillo de US\$ 0,63. Es importante resaltar que este estudio empleó datos de productividad agrícola reales y la productividad del higüerillo estaba muy baja.

Los valores presentados por el fabricante de equipos Dedini (homepage, 2007) indican el costo de producción del biodiesel de soya alrededor de US\$ 450 por tonelada con pequeñas variaciones en función de la capacidad de la planta y del origen de las materias primas como granos de soya (planta integrada industrialmente) o aceite de soya (planta de biodiesel). Los valores de costos de producción son siempre mayores para el segundo caso.

Tomando en cuenta los valores promedios ya presentados en este trabajo para costos de operación de los procesos de extracción y de transesterificación, los costos agrícolas de oleaginosas, sus precios de mercado, los precios de aceites, los precios de tortas y glicerina, así como el contenido de aceite en los granos o frutos, se estimaron los costos de producción para la soya, la palma y el higüerillo para los tres tipos de integración discutidas. El cuadro 33 presenta las hipótesis empleadas y el cuadro 34 los resultados obtenidos. Los costos presentados en el cuadro 34 son tan solo indicativos, pues los valores calculados pueden variar si las hipótesis empleadas cambian.

Cuadro 33

## ESTIMACIONES DE COSTOS DE BIODIESEL – HIPÓTESIS.

Hipótesis	Soya	Palma	Higüerillo
Costo de granos – US\$/ton granos	230	55	200
Precio de granos – US\$/ton granos	258	--	248
Precio del aceite – US\$/ton aceite	580	450	800
Costo de extracción – US\$/ton aceite	12	35	48
Costo del proceso – US\$/ton biodiesel	170	166	200
Venta de torta – US\$/ton torta	220	11	40
Venta de glicerina – US\$/ ton glicerina	650	650	650

Fuente: valores ya presentados anteriormente.

Es necesario mencionar que, en el caso de la palma, no existe un mercado de frutos, por lo que si la empresa es integrada, su integración empieza en la etapa agrícola. Los productores independientes de palma trabajan bajo contratos y no existen opciones para la comercialización *spot* de los frutos de palma.

Los costos de producción de biodiesel de soya son muy afectados por los precios relativos de la soya en grano, y de su torta y aceite. Existen situaciones de precios de mercado donde instalaciones no integradas pueden operar con menor costo total a pesar de adquirir el aceite en grado comercial.

Existen otras variables que afectan los costos de producción. El uso parcial de la capacidad productiva aumenta los costos. Según S&T<sup>2</sup> (2005), la operación a 80% de la capacidad incrementa el costo de producción en un 9% del valor nominal. Cuanto menor sea el uso, este efecto se vuelve

más importante. Los precios de los subproductos también afectan los costos del biodiesel como ya fue mostrado en el gráfico 5 en el caso de la glicerina. Para plantas integradas, el valor de mercado de las tortas es de fundamental importancia para ayudar a reducir costos.

Cuadro 34

ESTIMACIONES DE COSTOS DE BIODIESEL – RESULTADOS  
(US\$/ton biodiesel)

Soya – Costos	Int. agrícola	Int. industrial	Aislada
Materias primas	1 140,40	1 279,23	591,84
Extracción de aceite	74,37	74,37	0,00
Costos del proceso	150,00	150,00	150,00
Total de costos	1 364,77	1 503,60	741,84
Ventas – Torta	823,01	823,01	0,00
Glicerina	65,00	65,00	65,00
Total de ventas	888,01	888,01	65,00
Costo final total	476,76	615,59	676,84
Higüerillo – Costos	Int. agrícola	Int. industrial	Aislada
Materias primas	462,77	573,83	816,33
Extracción de aceite	111,06	111,06	0,00
Costos del proceso	200,00	200,00	200,00
Total de costos	773,83	884,90	1 016,33
Ventas – Torta	128,05	128,05	0,00
Glicerina	65,00	65,00	65,00
Total de ventas	193,05	193,05	65,00
Costo final total	580,78	691,85	951,33
Palma – Costos	Int. agrícola	No se aplica	Aislada
Materias primas	260,31		459,18
Extracción de aceite	165,65		0,00
Costos del proceso	166,00		166,00
Total de costos	591,96		625,18
Ventas – Torta	36,75		0,00
Glicerina	65,00		65,00
Total de ventas	101,75		65,00
Costo final total	490,21		560,18

Fuente: Elaboración propia.

### 3. Formación de precios para el biodiesel: costos, márgenes y tasas

La formación de precios para el biodiesel depende del costo de producción, del margen esperado por el productor de biodiesel, de los márgenes comerciales de almacenamiento, transporte, distribución y venta al detalle y de las tasas o impuestos que se aplican al producto. Como el biodiesel se destina a sustituir al diesel, es común que se le apliquen las tasas de hidrocarburos y/o impuestos del tipo IVA. En general, países que tienen políticas de incentivos al biodiesel hacen exenciones parciales o totales de impuestos y tasas con tal de viabilizar la penetración de este nuevo producto. Cuando los impuestos sobre los hidrocarburos son elevados, mayor es la capacidad de incentivo del gobierno. En el cuadro 35 se muestran los tributos sobre el diesel de petróleo en varios países y las exenciones parciales o totales aplicadas.

En el caso de Brasil, las exenciones de impuestos federales varían de acuerdo con la región del país, con las oleaginosas empleadas y con el tipo de producción (extensiva o familiar). La exención total ocurre para producción de palma o higüerillo en producción familiar (pequeño productor) en la región Norte o Nordeste (R\$ 0,218 – ó US\$ 0,104 por litro). Para agricultura familiar, en otras regiones y para cualquier siembra oleaginosa, la exención es de R\$ 0,148 (US\$ 0,070) por litro. Para producción de palma o higüerillo en producción extensiva, la exención es de R\$ 0,067 (US\$ 0,032) por litro. Para otras condiciones no existen exenciones.

Cuadro 35

## IMPUESTOS SOBRE EL DIESEL Y EXENCIONES VIGENTES PARA EL BIODIESEL

País	Impuestos o tasas para diesel	Exenciones para biodiesel	Impuestos o tasas para biodiesel
	US\$ / litro	US\$ / litro	US\$ / litro
Reino Unido	0,825	0,350	0,475
Alemania	0,567	0,452	0,115
Italia	0,498	0,498	0,000
Francia	0,503	0,426	0,077
Brasil	0,104	0,104 <sup>a</sup>	0,000
USA	0,121	0,121	0,000

Fuente: Elaboración propia.

a/ Máxima exención.

Para mostrar cómo los precios de las materias primas influyen sobre los costos de producción y, por lo tanto, los precios mínimos de venta, se presentan simulaciones para el caso de la soya, mostrados en los gráficos 6 y 7.

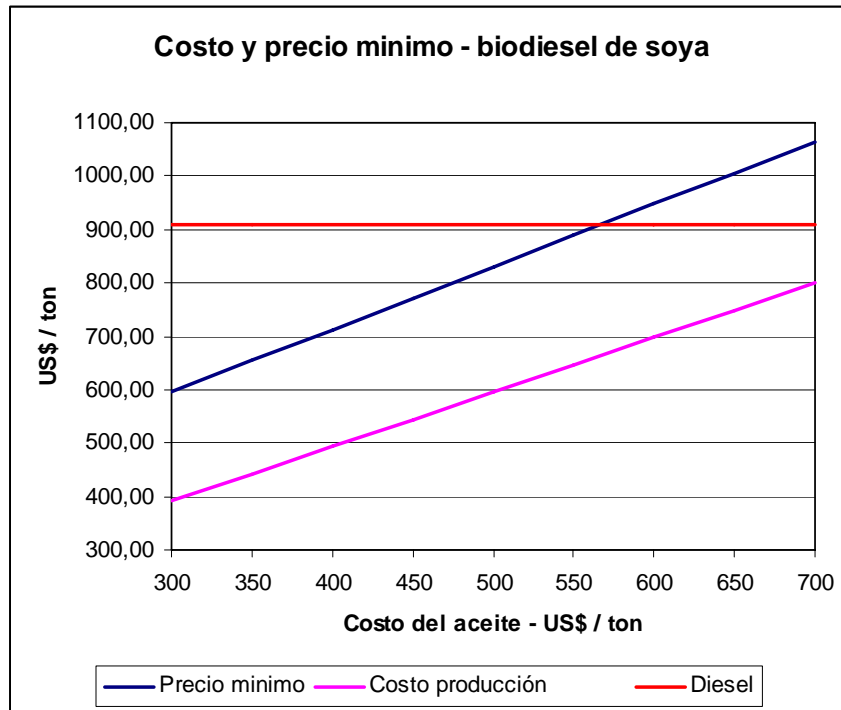
Las hipótesis empleadas para la determinación de los costos y precios mínimos son: costos de extracción de aceite y del proceso de transesterificación (sin materias primas) constantes, valor de mercado de harina de soya a US\$ 10 sobre el costo agrícola y valor de mercado de glicerina constante a US\$ 650. La diferencia entre el costo de producción y el llamado precio mínimo toma en cuenta el margen de la industria, fijo en 15% sobre el costo de producción y los márgenes de comercialización, fijos en dólares y equivalentes a los márgenes usuales en el mercado de distribución y comercialización al detalle del diesel de petróleo. No se consideran tributos, es decir, las exenciones son totales.

En el gráfico 6 se indican los costos de producción de una planta de biodiesel aislada que compra su materia prima (aceite vegetal) en el mercado. El precio al consumidor del diesel (valores para Brasil) es el límite para el precio mínimo para que el nuevo producto no sea más costoso para el consumidor. En el caso del gráfico 6, el precio límite para la adquisición del aceite de soya es alrededor de US\$ 550 por tonelada. Cabe señalar que los impuestos y tasas colocan la línea de precio mínimo aún más elevada y entonces el valor límite para el aceite de soya es más bajo.



Gráfico 6

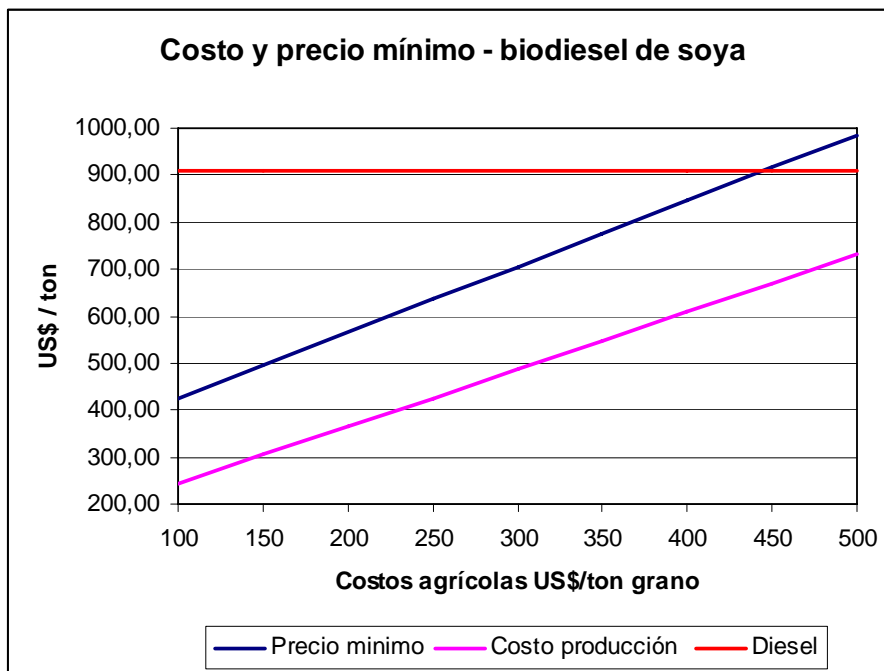
## INFLUENCIA DEL COSTO DEL ACEITE SOBRE LA VIABILIDAD DEL BIODIESEL



Fuente: Elaboración propia, datos Brasil.

Gráfico 7

## INFLUENCIA DE COSTOS AGRÍCOLAS SOBRE LA VIABILIDAD DEL BIODIESEL



Fuente: Elaboración propia, datos Brasil.

Para verificar qué ocurre con los costos de producción y los precios mínimos para el biodiesel cuando la planta productora es completamente integrada, es decir, cuando la materia prima es afectada por los costos agrícolas se simuló la variación de costos agrícolas para obtención de la soya en grano en el rango de US\$ 100 hasta US\$ 500 dólares. Como se ve en el gráfico 7, el costo máximo para la producción agrícola de soya está alrededor de los US\$ 450. Si hay impuestos o tasas, el costo agrícola en que el precio mínimo del biodiesel encuentra el precio de mercado del diesel será menor.

Lo gráficos 6 y 7 son solamente ilustrativos. En realidad, unas cuantas variaciones de costos o precios de venta pueden hacer que la planta produzca un resultado económico neto positivo o negativo. En el trabajo de Booth y otros. (2005), un estudio de sensibilidad de la viabilidad económica para una planta de biodiesel empleando colza como materia prima mostró que la rentabilidad es fuertemente afectada por el precio que se obtiene con la venta del biodiesel y con el precio de la materia prima. La evaluación empleó los conceptos de valor actual neto (NPV en inglés), de tasa interna de retorno (IRR en inglés) y tiempo de recuperación de la inversión (*Pay-back*). El tiempo de vida del proyecto fue de 10 años y la tasa de interés adoptada fue de 8% al año. Cuando el precio de venta del biodiesel varía de US\$ 0,683 por litro hasta US\$ 0,753 por litro (alrededor de 10%), los parámetros de rentabilidad varían mucho más: de un NPV negativo a otro positivo y alto, de una tasa interna de retorno de 2,9% para 23,5% y de un *pay back* de 8 años para otro de 4 años. El efecto del precio del aceite empleado (colza y reciclado) es similar: cuando el precio del aceite varía de US\$ 290 hasta US\$ 237 hasta (alrededor de 22%), el NPV pasa de negativo a positivo, la IRR cambia de 2,9% a 30,3% y el *pay back* cambia de 6 para 4 años.

#### a) **Precios de biodiesel: Alemania y Estados Unidos**

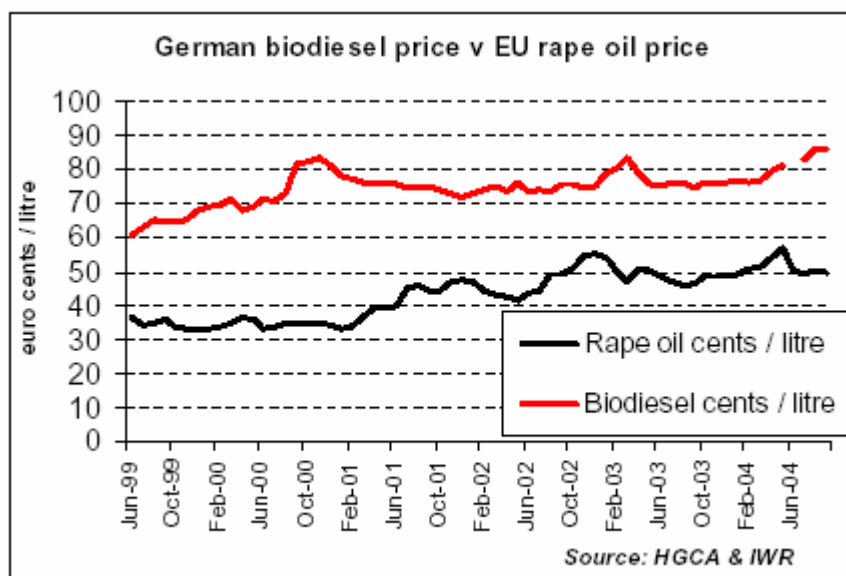
El gráfico 8 muestra los precios del biodiesel y del aceite de colza en Alemania, en centavos de Euro, desde 1999 hasta 2005. Como el país tenía exenciones totales de tasas en ese período, el consumo de biodiesel creció de forma vigorosa como se mostró en el capítulo II. A pesar de tendencias similares, la correlación entre los precios de biodiesel y de aceite de colza no es tan buena. Esto ocurre porque el precio del biodiesel no es determinado por sus costos, sino por el precio del diesel de petróleo, como se puede comprobar a través del gráfico 9.

Los precios del biodiesel variaron entre €0,60 y €0,86 (US\$ 0,768 y US\$ 1.101) por litro. Cabe resaltar que el diesel de petróleo estuvo siempre a precios aún más elevados.

En los Estados Unidos, los precios del biodiesel varían de estado en estado, en función de las diferentes políticas estatales de incentivo (o no) para el producto. El Energy Management Institute publica semanalmente los precios de combustibles alternativos (no necesariamente renovables) de acuerdo con las definiciones de la Environment Protection Agency (EPA): el Alternative Fuels Index. El 8 de marzo de 2007 (AFI, 2007) los precios de biodiesel sin impuestos oscilaban en el rango de US\$ 2,72 hasta US\$ 3,38 por galón (de US\$ 0,7185 hasta US\$ 0,8929 por litro). El valor promedio estaba en US\$ 3,1166 por galón (US\$ 0,8233 por litro). Para comparación, el costo del diesel de petróleo promedio sin tasas estaba en US\$ 2,0992 por galón (US\$ 0,5546). Con las tasas, el diesel llegaba alrededor de US\$ 0,72 por litro, es decir, en los Estados Unidos el biodiesel es aún más costoso que el diesel de petróleo.

Gráfico 8

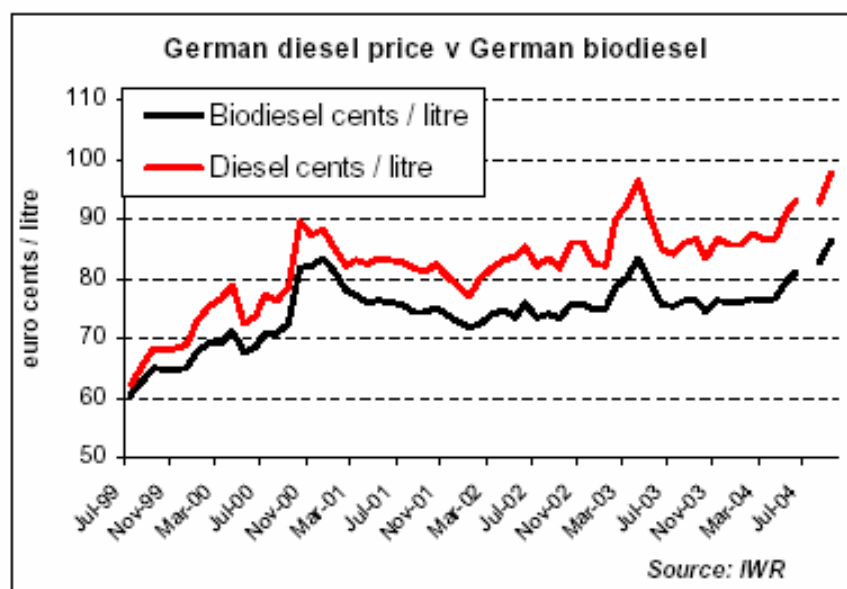
## PRECIOS DE ACEITE DE COLZA Y DE BIODIESEL EN ALEMANIA



Fuente: IWR Internacional Wirtschaftsforum Regenerative Energies, [www.iwr.de/biodiesel](http://www.iwr.de/biodiesel)

Gráfico 9

## PRECIOS DE DIESEL Y DE BIODIESEL EN ALEMANIA



Fuente: IWR Internacional Wirtschaftsforum Regenerative Energies, [www.iwr.de/biodiesel](http://www.iwr.de/biodiesel)

## **b) Mecanismos de compensación o de obligatoriedad**

Al inicio de los años noventa en Europa, cuando la industria del biodiesel comenzaba a ser instalada, los precios de los contratos de la colza para fabricación del biodiesel eran mucho menores que los precios de colza usada para alimentación. Como la colza para fines no-alimenticios era producida en las tierras de *set-aside* y los agricultores no tenían mejores opciones, los contratos eran muy diversos de la producción para alimentos y a menores costos. A medida que la capacidad de producción y el consumo del biodiesel aumentaron, los precios de la colza para fines industriales (incluyendo biodiesel) y para alimentación se aproximaron. En 1996, la proporción de biodiesel producido en Alemania por colza producida en tierras del *set-aside* frente a áreas de siembra normales era de 98:2; en el año 2005, la proporción ya cambió para 30:70, es decir, actualmente la mayor parte de la colza para biodiesel proviene de áreas de siembra normales y no de áreas de *set-aside* (Gärtner, 2005).

En Europa se acepta que la industria de biodiesel no sea capaz de producir ganancias sin apoyos fiscales. Como el biodiesel es parte del esfuerzo para cumplir las metas de reducción de emisiones de dióxido de carbón, los gobiernos desarrollan políticas de exenciones fiscales como forma de incentivo el consumo de biodiesel. Además, la colza y el biodiesel tienen importancia también como política de protección para los agricultores.

En los Estados Unidos, el Departamento de Agricultura (USDA) ofreció un crédito para los inversionistas en biodiesel para mejorar las condiciones de viabilidad de los proyectos. Existen pagos de US\$ 1,45 por galón de biodiesel de soya producido sobre la producción del año anterior (incentivo al aumento de producción). Recientemente, el gobierno del Presidente Bush instituyó un subsidio de US\$ 1 por galón de biodiesel producido de aceite vegetal y de US\$ 0,50 por galón de biodiesel producido por aceite reciclado.

Como se ha mostrado, Brasil posee una política para el biodiesel donde las exenciones fiscales son selectivas y dependen de la región del país, de las oleaginosas escogidas como prioridad para la producción del biodiesel y de la organización de la producción agrícola. Sobre todos los productos comercializados, los estados de Brasil aplican un impuesto similar al IVA y que puede variar en cada Estado. Por ejemplo, para el diesel un estado usa un impuesto de 12% y otro estado un impuesto de 25%. La cuestión de los impuestos federales ya fue resuelta pero no para los Estados.

Otra forma de incentivo a la introducción del biodiesel en las matrices energéticas es la concesión de préstamos con largos plazos de carencia y a tasas anuales bajas. Esto ayuda a hacer viables las inversiones de capital necesarias.

Decisiones de carácter político también pueden ayudar a la adopción del biodiesel. Como ejemplo, se puede mencionar la decisión de la Comisión Europea de poner metas de uso de combustibles de fuentes renovables en los transporte para los años 2005 (2%) y 2010 (5,75%). La sustitución de parte del consumo de las gasolinas debe ocurrir con el uso de bioetanol en mezclas con gasolina (o de ETBE – Etil-tercio-butil éter, un éter producido a partir del bioetanol). Para los motores diesel, la sustitución debe ocurrir a partir del biodiesel o aún del uso de aceites vegetales sin modificación en motores convertidos. En la Unión Europea existen permisos para uso de hasta el 5% de biodiesel en mezcla con diesel sin necesidad de un sistema de distribución

específico (como en Alemania) y sin necesidad de alerta a los consumidores. Aun así, la adición de biodiesel al diesel de petróleo no es obligatoria.

En los Estados Unidos existe obligatoriedad para uso de combustibles alternativos (definidos por la EPA) en el caso de flotas y vehículos de administración pública en todos los niveles, federal, estatal o municipal. En el caso de biodiesel, el contenido del producto en la mezcla con diesel debe ser de 20% o más para poder cumplir la determinación de obligatoriedad. De esta forma, sólo las flotas cautivas<sup>1</sup> emplean el biodiesel en cantidades significativas.

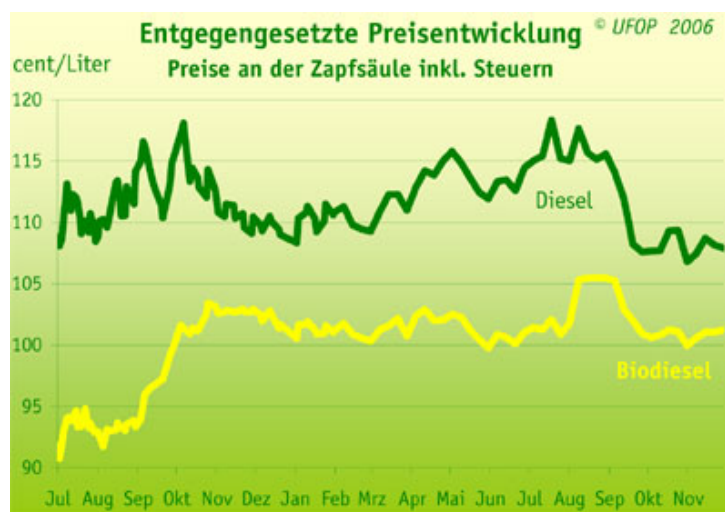
Brasil adoptó una condición de obligatoriedad para la adición de biodiesel en el diesel en mezcla de 2% (B2) a partir de enero de 2008. La proporción de biodiesel subirá a 5% en el 2013. La definición de trabajar con el concepto de obligatoriedad es similar al que ya existe hace muchos años para la gasolina, donde se mezcla etanol anhidro (entre 20% y 25%, dependiendo de la disponibilidad del bioetanol).

#### 4. Comparación: precios de petróleo, diesel y de biodiesel

En países donde hay impuestos elevados y existen exenciones de tasas, los precios finales del biodiesel al consumidor pueden ser más bajos que del diesel, como sucede en Alemania y podría ocurrir en otros países de la Unión Europea como en el Reino Unido y en Holanda en caso de que las exenciones fiscales fuesen totales. El gráfico 9 mostró que en Alemania el biodiesel siempre es menos caro que el diesel (precios de 1999 hasta 2005). El gráfico 10 muestra lo mismo para los años 2005 y 2006.

Gráfico 10

#### PRECIOS DE DIESEL Y BIODIESEL EN ALEMANIA, 2006



Fuente: Unión Zur Förderung von Oel-und Proteinpflanze. V. (UFOP) Berlin.

<sup>1</sup> Flotas de vehículos usados para fines específicos, como autobuses de uso urbano, vehículos de colecta de basura, etc., siempre de una sola empresa, que recibe el biodiesel de forma independiente de las estaciones de servicio.

El precio del diesel es un factor determinante para viabilizar el biodiesel. Como los costos de producción del producto son elevados, cuanto más elevado es el precio del diesel, más viable es el del biodiesel. Los precios del diesel son condicionados por márgenes comerciales, tributos y costos de producción. Así, el precio del petróleo en los mercados internacionales puede ser tomado como indicador para la viabilidad económica del biodiesel.

Woods y Bauen (2003) analizaron cómo el precio del barril de petróleo influía en la viabilidad económica del biodiesel. Los resultados obtenidos en aquel estudio se muestran en el cuadro 36. El costo adicional del biodiesel reportado en el cuadro se definió como la diferencia entre el costo de producción de biodiesel y el costo de producción del diesel de petróleo, es decir, los valores reportados informan cuánto más cuesta el biodiesel en relación a los costos de producción del diesel.

Cuadro 36

## COSTO ADICIONAL DEL BIODIESEL Y PRECIOS DE PETRÓLEO

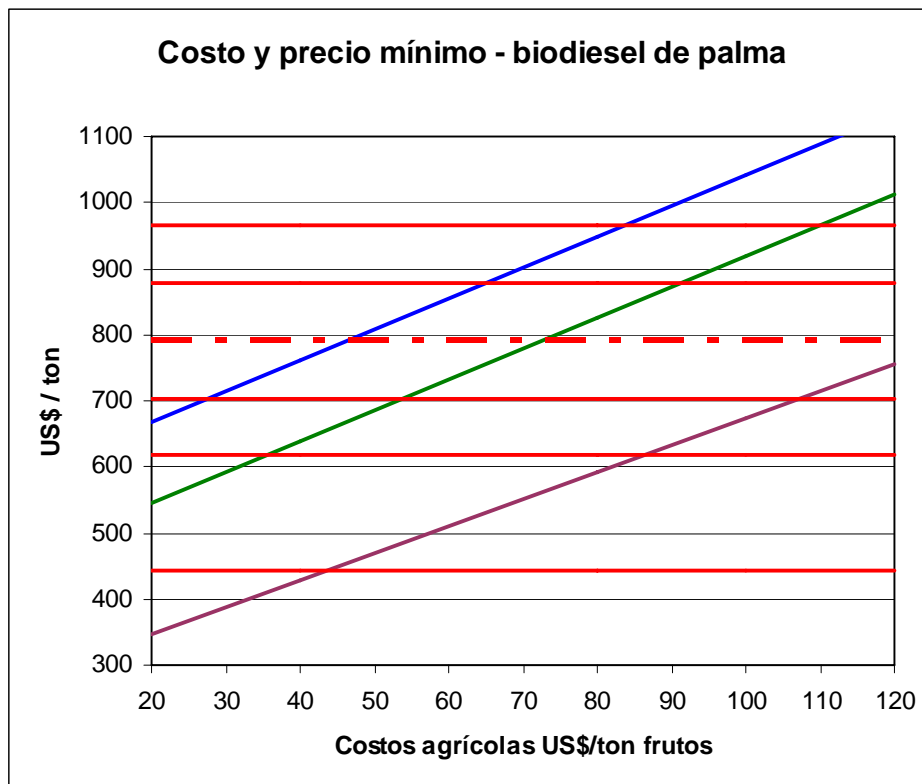
Precio del petróleo – Brent US\$ / barril	Costo adicional del biodiesel US\$ /litro
20	0,448
25	0,384
30	0,320
35	0,256

Fuente: Woods & Bauen, 2003.

Empleando las mismas hipótesis y el mismo método usado para construir los gráficos 6 y 7, se presenta en el gráfico 11, el costo de producción, el precio mínimo sin impuestos y el precio mínimo con impuestos para el biodiesel de palma producido de forma integrada. Los diversos precios de diesel incluidos corresponden a diferentes precios del petróleo y permiten determinar cómo el precio del petróleo puede viabilizar o no la producción de biodiesel. Las tres líneas inclinadas corresponden a costo, precio sin impuestos y precios con impuestos. Las líneas horizontales corresponden al precio del diesel al consumidor para precios de petróleo de US\$ 20, US\$ 40, US\$ 50, US\$ 60, US\$ 70 y US\$ 80 por barril. Los precios actuales del petróleo están alrededor de US\$ 60 por barril (línea roja quebrada). Para estos precios de petróleo, el biodiesel de palma debería tener un costo agrícola máximo de alrededor de US\$ 45 por tonelada de frutos para poder pagar todos los tributos e igualar el precio con el diesel. Si existen exenciones totales de impuestos, el costo agrícola máximo sería alrededor de US\$ 73 por tonelada de frutos. Como límite, el mayor costo de producción es alrededor de US\$ 125 /ton (fuera del gráfico) sin ningún margen comercial para distribución o de retorno para el productor.

Gráfico 11

## COSTO Y PRECIOS DE BIODIESEL DE PALMA Y PRECIOS DEL PETRÓLEO



Fuente: Elaboración propia. Datos Brasil.

Las comparaciones entre precios de biodiesel y precios de mercado del diesel para los países de Centroamérica estudiados son presentadas en los siguientes capítulos.