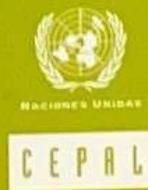
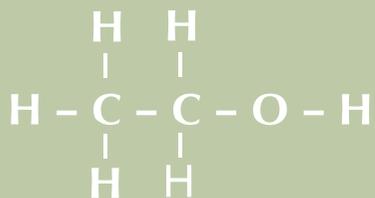


BIOETANOL

Bioetanol de
Caña de Azúcar
Energía para el
Desarrollo
Sostenible





Bioetanol de Caña de Azúcar

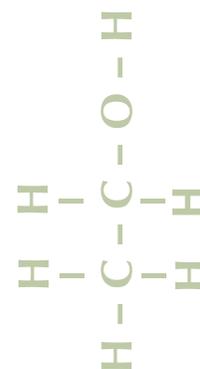
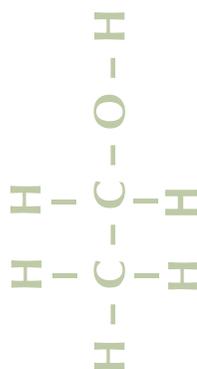
Energía para el Desarrollo Sostenible

Coordinación
BNDES y CGEE

www.bioetanoldecanadeazucar.org

1ª Edición

Río de Janeiro – Noviembre 2008



B615b Bioetanol de caña de azúcar : energía para el desarrollo sostenible / coordinación BNDES y CGEE. – Rio de Janeiro : BNDES, 2008.

320 p.

ISBN: 978-85-87545-26-8

1. Bioenergía. 2. Biocombustible. 3. Bioetanol. 4. Caña de azúcar. I. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. II. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos.

CDD 333.953

Equipo Técnico

Coordinación – BNDES e CGEE

BNDES

Armando Mariante Carvalho Junior
Julio Cesar Maciel Ramundo
Carlos Eduardo de Siqueira Cavalcanti
Paulo de Sá Campello Faveret Filho (supervisión)
Nelson Isaac Pfefer (supervisión)
Sergio Eduardo Silveira da Rosa
Artur Yabe Milanez

CGEE

Antonio Carlos Galvão
Marcelo Khaled Poppe

Organización y responsabilidad técnica

Luiz Augusto Horta Nogueira – *Unifei*

Redacción y consultoría

Luiz Augusto Horta Nogueira – *Unifei*
Joaquim Eugênio Abel Seabra – *Unicamp*
Gustavo Best – *consultor FAO/Cepal*
Manoel Regis Lima Verde Leal – *Cenea*
Marcelo Khaled Poppe – *CGEE*

Colaboración institucional – Cepal y FAO

Cepal

Adrián Rodríguez
José Javier Gómez
Joseluis Samaniego
Manlio Coviello
Martine Dirven

FAO

Alberto Saucedo
Guilherme Schuetz

Agradecimientos

Adhemar Altieri – *Unica*
Alfred Szwarc – *Unica*
Aluysio Antonio da Motta Asti – *BNDES*
André Correa do Lago – *MRE*
Antonio Barros de Castro – *BNDES*
Antonio Dias Leite – *consultor*
Arnaldo Vieira de Carvalho – *BID*
Edmar Fagundes de Almeida – *UFRJ*

Isaias de Carvalho Macedo – *Unicamp*
João Carlos Ferraz – *BNDES*
Luis Augusto Barbosa Cortez – *Unicamp*
Marcio Nappo – *Unica*
Rafael Capaz – *Unifei*
Rafael Pontes Feijó – *BNDES*
Rogério Cezar de Cerqueira Leite – *Unicamp*
Tammy Klein – *IFQC*

Índice

Prefacio 13

Presentación 17

1. Bioenergía y biocombustibles 23

- 1.1 Fundamentos de la bioenergía 25
- 1.2 Evolución de la bioenergía y de los biocombustibles 32

2. Etanol como combustible vehicular 39

- 2.1 Dimensiones técnicas y ambientales del uso del etanol 41
- 2.2 Aspectos económicos e institucionales del etanol combustible 54
- 2.3 Cadenas logísticas para el etanol 60

3. Producción de bioetanol 67

- 3.1 Materias primas y tecnologías de producción del bioetanol 69
- 3.2 Bioetanol de caña de azúcar 72
- 3.3 Bioetanol de maíz 83
- 3.4 Bioetanol de otras materias primas 89
- 3.5 Productividad, emisiones y balances energéticos 92

4. Coproductos del bioetanol de caña de azúcar 103

- 4.1 Azúcar y derivados 105
- 4.2 Bioelectricidad 108
- 4.3 Otros coproductos del bioetanol de caña de azúcar 118

5. Tecnologías avanzadas en la agroindustria de la caña de azúcar 123

- 5.1 Hidrólisis de residuos lignocelulósicos 125
- 5.2 Gasificación para la producción de combustibles y electricidad 133
- 5.3 Uso del bioetanol como insumo petroquímico o alcoholquímico 140
- 5.4 Producción de plásticos biodegradables 143
- 5.5 Biorrefinería: múltiples productos y uso integral de la materia prima 147

6. Bioetanol de caña de azúcar en Brasil 151

- 6.1 Evolución del bioetanol combustible en Brasil 153
- 6.2 Agroindustria de la caña de azúcar en Brasil 162
- 6.3 Investigación y desarrollo tecnológico 169

7. Sostenibilidad del bioetanol de caña de azúcar: la experiencia brasileña 179

- 7.1 Ambiente y energía de la caña de azúcar 181
- 7.2 Uso del suelo 196

7.3 Viabilidad económica del bioetanol de caña de azúcar	203
7.4 Generación de empleo y renta en la agroindustria del bioetanol	209
7.5 Certificación y sostenibilidad en la agroindustria del bioetanol	217

8. Perspectivas para un mercado mundial de biocombustibles 221

8.1 Potencial global para la producción de biocombustibles	223
8.2 Oferta y demanda de biocombustibles: escenario actual	229
8.3 Proyecciones de oferta y demanda de bioetanol en 2010–2015	234
8.4 Políticas de apoyo y fomento a los biocombustibles	249
8.5 Vínculos entre alimentos y bioenergía	253
8.6 Factores de inducción para un mercado global de bioetanol	265

9. Una visión de futuro del bioetanol como combustible 273

Anexos 283

Referencias 289

Índice de recuadros, figuras, gráficos y tablas

Recuadros

- El etanol en motores aeronáuticos 53
- Las posibilidades del azúcar orgánico 107
- Evolución de la producción de electricidad en una planta brasileña 115
- Primeros pasos de la etanolquímica en Brasil 142
- Mejoramiento genético y disponibilidad de cultivares 171

Figuras

- 1 El proceso de fotosíntesis 26
- 2 Pluviosidad media anual 28
- 3 Vías tecnológicas para producción de bioenergía 32
- 4 Solubilidad de agua en mezclas gasolina/etanol 47
- 5 Modelo de producción, stock y demanda de etanol 61
- 6 Logística de la gasolina y del etanol en Brasil 63
- 7 Rutas tecnológicas para la producción de bioetanol 70
- 8 Estructura típica de la biomasa de la caña 73
- 9 Distribución de las 350 plantas de procesamiento de caña de azúcar en Brasil 75
- 10 Diagrama del movimiento de la producción de azúcar y bioetanol de caña 79
- 11 Estructura típica de la biomasa del maíz 84
- 12 Distribución de la producción de maíz en los Estados Unidos 84
- 13 Organigrama del proceso de molienda húmeda para la producción de bioetanol con maíz 87
- 14 Organigrama del proceso de molienda seca para la producción de bioetanol con maíz 88
- 15 Diagrama del ciclo de vida de un biocombustible 93
- 16 Análisis de sensibilidad del uso de la energía y de relación consumo/producción de energía en la producción de caña de azúcar en el escenario actual (2005/2006) 97
- 17 Análisis de sensibilidad de las emisiones de GEE en la producción de bioetanol de caña de azúcar en el escenario actual (2005/2006) 98
- 18 Configuración usual del sistema de cogeneración en la agroindustria de la caña 110
- 19 Esquema del proceso de producción de etanol por medio de la hidrólisis de la biomasa 126
- 20 Representación esquemática de un sistema BIG/GT-CC 135
- 21 Flujograma general para la producción de metanol, hidrógeno y diésel vía gasificación de biomasa (Fischer-Tropsch) 138

- 22 Diagrama de flujo de la producción de PHB a base de azúcar de caña 145
- 23 Ciclo integrado completo agro-biocombustible-biomaterial-bioenergía para tecnologías sostenibles 147
- 24 Localización de los nuevos ingenios de azúcar y etanol en Brasil 165
- 25 Ocupación porcentual de las principales variedades de caña de azúcar en Brasil de 1984 a 2003 172
- 26 Ejemplo de una imagen tomada por un satélite, utilizada para el monitoreo de la cobertura vegetal 193
- 27 Potencial del cultivo de caña sin irrigación 200
- 28 Potencial del cultivo de caña con irrigación de salvación 200
- 29 Áreas cultivadas con plantaciones de caña de azúcar 202
- 30 Visión general de los elementos principales usados en la metodología de la evaluación del potencial bioenergético 224
- 31 Contribución de la bioenergía a la oferta primaria y secundaria de energía en el año 2007 230

Gráficos

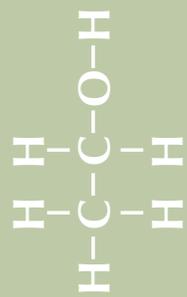
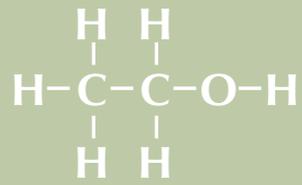
- 1 Usos de la superficie cultivable en la Tierra 29
- 2 Participación de la bioenergía en la oferta interna de energía en Brasil 34
- 3 Contribución de la bioenergía en función de la renta per capita 35
- 4 Evolución de las emisiones de vehículos nuevos en Brasil 50
- 5 Precio de indiferencia del etanol anhidro en función del precio del azúcar 55
- 6 Precio internacional del azúcar (Contrato nº 11 NYBOT) 56
- 7 Precios de indiferencia del etanol frente al azúcar y internacional de la gasolina 57
- 8 Productividad promedio de etanol por área para diferentes cultivos energéticos 71
- 9 Distribución de la producción mundial de etanol en el año 2006 72
- 10 Principales países productores de caña de azúcar en el año 2005 73
- 11 Consumo de azúcar per capita en diversos países 108
- 12 Posibilidad de instalación de sistemas de cogeneración en las plantas de azúcar y bioetanol en el Estado de São Paulo, en los próximos años 114
- 13 Valor del bagazo utilizado para producir electricidad 116
- 14 Valor del bagazo utilizado para la producción de etanol 117
- 15 Uso de energía (a) y emisiones de GEI (Gases de Efecto Invernadero) (b) para la producción de plásticos 144
- 16 - Evolución de la producción de caña de azúcar, etanol y azúcar en Brasil 159
- 17 Promedio de concentración de etanol anhidro en la gasolina brasileña 160
- 18 Evolución de la producción de vehículos a etanol hidratado y de su participación en las ventas de vehículos nuevos 160
- 19 Fuentes primarias de energía utilizadas en Brasil en el año 2007 161

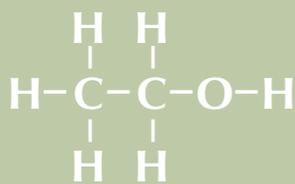
20 Distribución de la capacidad anual de procesamiento de las plantas de azúcar y etanol en Brasil	163
21 Perfiles de producción de los ingenios de azúcar y etanol en Brasil en la cosecha 2006/2007	164
22 Evolución de la productividad agrícola, industrial y agroindustrial de los ingenios de azúcar y etanol en Brasil	167
23 Evolución de los precios pagados a los productores de etanol en Brasil	168
24 Consumo de fertilizantes en las principales plantaciones de Brasil	190
25 Pérdidas de suelo y de agua de lluvia en algunos cultivos en Brasil	191
26 Deforestación anual en la región amazónica brasileña	195
27 Uso de la tierra en propiedades rurales de Brasil	197
28 Evolución del área utilizada por los principales cultivos en Brasil	198
29 Uso de la tierra en Brasil	198
30 Evolución de precios pagados al productor (sin tributos) de gasolina en los EE.UU. y de bioetanol de caña de azúcar en Brasil	204
31 Estructura de los precios al consumidor de la gasolina común, el bioetanol hidratado y el diésel en Rio de Janeiro en marzo de 2008	205
32 Evolución de los precios promedio pagados por el consumidor de bioetanol hidratado y de gasolina común y análisis de la relación entre estos precios en Brasil	206
33 Estructura de los costos de producción de la caña de azúcar en la región centro sur en el año 2005	208
34 Estructura de costos de operación y mantenimiento de una destilería autónoma dedicada a la producción de bioetanol de caña de azúcar en la región centro sur en el año 2005	209
35 Productividad promedio de los trabajadores de la agroindustria de caña en Brasil	211
36 Potencial bioenergético por tipo de biomasa	225
37 Distribución de la producción de etanol por regiones, año 2007	234
38 Fracción de la demanda de bioetanol para agregar el 10% a la gasolina que se puede producir mediante la conversión de melaza disponible en la fabricación de azúcar	241
39 Fracciones de las áreas de cultivo (total y en caña) necesarias para producir el bioetanol requerido para agregar un 10% a la gasolina, asumiendo la conversión de jugo directo	242
40 Estimaciones de oferta y demanda de bioetanol combustible para los años 2010 y 2015	248
41 Índices de precios para el petróleo y los productos agrícolas	262
42 Índices de precios para el petróleo y los productos agrícolas asociados al bioetanol y al biodiésel	263
43 Índices de precio para el petróleo bruto y los productos agrícolas asociados al bioetanol	264

Tablas

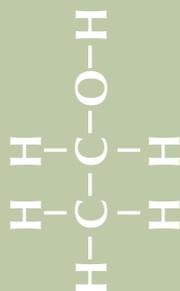
1	Parámetros de desempeño vegetal para los ciclos fotosintéticos	30
2	Propiedades de la gasolina y del bioetanol	41
3	Exigencias de modificaciones en vehículos para diferentes concentraciones de bioetanol en la gasolina	44
4	Efecto del bioetanol en el octanaje de la gasolina-base	45
5	Durabilidad de materiales plásticos en bioetanol	48
6	Panorama general de los biocombustibles	69
7	Principales parámetros agrícolas de la caña de azúcar	76
8	Demanda de energía en el procesamiento de la caña	82
9	Pérdidas y rendimientos promedios de las plantas de caña	83
10	Demanda de fertilizantes y defensivos para la producción de maíz en los EE.UU.	86
11	Rendimientos de los coproductos en la molienda húmeda	87
12	Balance de energía en la producción de bioetanol de caña	95
13	Emisiones en la producción del bioetanol de caña	95
14	Emisiones líquidas de la producción y uso del bioetanol de caña	96
15	Balance de energía y emisiones de GEE en el caso del bioetanol de maíz en los EE.UU.	99
16	Comparación de las diferentes materias primas para la producción de bioetanol	100
17	Principales países productores y exportadores de azúcar en la cosecha 2006/2007	105
18	Energía eléctrica y bagazo excedente en sistemas de cogeneración en la agroindustria de la caña	113
19	Nuevos productos de la agroindustria de la caña de azúcar	120
20	Procesos para el pretratamiento de la biomasa para hidrólisis	127
21	Comparación de las diferentes opciones para la hidrólisis de la celulosa	128
22	Comparación de las estimaciones de rendimientos y costos para la producción de bioetanol por medio de la hidrólisis	131
23	Comparación de las estimaciones de rendimiento y costos de los sistemas BIG/GT-CC	137
24	Comparación de los rendimientos y costos para la producción de combustibles de síntesis	139
25	Procesos básicos de la industria alcoholquímica	141
26	Impacto de la introducción de nuevas tecnologías en la producción de bioetanol	174
27	Expectativas de ganancias de eficiencia en procesos de producción de bioetanol	174
28	Balance resumido de las emisiones de CO ₂ en la agroindustria del bioetanol de caña de azúcar en el centro sur brasileño	182
29	Efluentes de la agroindustria del bioetanol	185
30	Uso de agroquímicos en las principales plantaciones de Brasil	188
31	Potencial para la producción de caña en Brasil	201

32	Demanda de áreas para la producción de bioetanol para abastecer el mercado global en 2025	202
33	Empleos directos formales del sector sucroalcoholero, según actividad y región	211
34	Impactos directos, indirectos e inducidos del procesamiento de un millón de toneladas de caña de azúcar para la producción de alcohol	216
35	Potencial total técnico de producción de bioenergía para diversas regiones y escenarios productivos en 2050	226
36	Potencial de diversas materias primas y sistemas productivos para bioenergía	228
37	Biocombustibles en la oferta total primaria de energía	232
38	Participación relativa de los biocombustibles en la oferta total primaria de energía	233
39	Capacidad, producción y consumo de bioetanol en la Unión Europea	238
40	Principales objetivos para el desarrollo de la bioenergía	250
41	Principales instrumentos de políticas energéticas relacionadas con la promoción de la bioenergía	252
42	Coefficientes de correlación simple entre los precios del petróleo y los precios de los productos directamente asociados a los biocombustibles, entre enero de 1990 y marzo de 2008, por subperíodos	265





Prefacio



*P*etróleo, gas natural y sus derivados representan el 55% del consumo mundial de energía. Son esos combustibles los que permiten la existencia de los medios de transporte rápidos y eficientes que tenemos hoy, así como gran parte de las actividades industriales. Lamentablemente, ellos no van a durar más que algunas décadas: como combustibles fósiles, sus reservas son finitas, la seguridad de abastecimiento es problemática para muchos países que los importan y su uso es la principal fuente de los gases que están provocando cambios climáticos y el calentamiento global.

Es preciso, entonces, encontrar sustitutos para esos combustibles. Nada más racional que producirlos en base a materia orgánica renovable (biomasa), a partir de la cual en un pasado distante, la naturaleza produjo los combustibles fósiles que utilizamos en la actualidad. Una de las opciones es el etanol, un excelente sustituto para la gasolina, principal combustible usado en automóviles en el mundo.

Hoy en Brasil, el etanol producido de caña de azúcar ya sustituye la mitad de la gasolina que sería usada si no existiera y su costo es competitivo sin los subsidios que viabilizaron el programa inicialmente. Eso se logró en cerca de 30 años a partir de la creación del Proálcool, programa lanzado en el país a mediados de la década de los setenta para reducir la dependencia de la importación de petróleo. Consideraciones económicas de la industria del azúcar también influenciaron en el establecimiento del programa, pero preocupaciones de carácter ambiental y social no tuvieron un papel significativo en ese momento.

En los Estados Unidos, gran productor mundial de etanol a base de maíz, el programa es más reciente y sus justificaciones son la eliminación de aditivos en la gasolina y la reducción de las emisiones de gases que provocan el calentamiento global. En los países de Europa Occidental también se usa etanol producido del trigo y de la remolacha. En esos países el costo del etanol es de dos a cuatro veces más elevado que

en Brasil y subsidios internos y barreras aduaneras protegen las industrias locales, impidiendo la importación del etanol de Brasil.

Esto viene creando resistencias de algunos grupos, que asocian el etanol (y el biodiesel, producido en cantidades menores) a un falso dilema, que es el de la producción de alimentos versus combustibles. Ese argumento no se sustenta si observamos que la producción de etanol en el mundo, de cerca de 50 mil millones de litros por año, utiliza 15 millones de hectáreas, o sea, el 1% del área en uso por la agricultura en el mundo, que es de 1,5 mil millones de hectáreas.

Argumentan esos grupos también que, en realidad, el uso de etanol no reduce las emisiones de gases de efecto invernadero, lo que es totalmente incorrecto en lo que se refiere al etanol de la caña de azúcar. Éste es, de hecho, prácticamente renovable, pues el bagazo una vez que el bagazo de la caña suministra toda la energía necesaria para la fase industrial de la producción del etanol. La situación de los Estados Unidos es menos cómoda, porque la producción del etanol exige el uso de energía que viene casi totalmente de combustibles fósiles. Se puede decir que el etanol del maíz es, en realidad, carbón convertido en etanol, mientras que en Brasil éste es casi enteramente de energía solar.

La expansión del cultivo de la caña de azúcar y del maíz involucra cambios en el uso del suelo, lo que puede implicar la emisión de gases de efecto invernadero si la expansión resulta en deforestación, lo que no es el caso de Brasil, donde la expansión está ocurriendo sobre pasturas. De todos modos, ése es un problema general de agricultura en expansión y no un problema de producción de etanol (o biodiesel). Si hay un dilema, se lo podría titular producción de alimentos versus cambios climáticos.

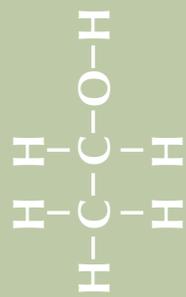
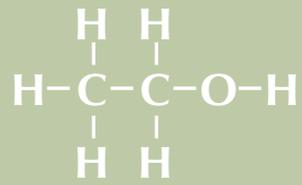
La que se puede denominar como “solución brasileña para los problemas de los combustibles fósiles” - el uso del etanol de caña de azúcar para sustituir la gasolina - no es exclusiva de nuestro país y se la está adoptando en otros países productores de caña de azúcar (de los cuales existen casi cien en el mundo), como Colombia, Venezuela, Mozambique e islas Mauricio.

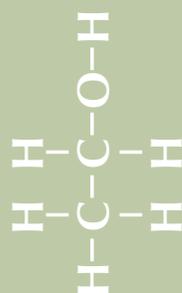
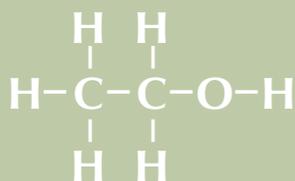
Esas y otras cuestiones son analizadas en profundidad en este libro, el cual describe las características biológicas de la caña de azúcar como planta, las técnicas de producción del alcohol y sus coproductos, como bioelectricidad, presentando el “estado del arte” de lo que se llama “tecnologías de primera generación”.

Hay además una discusión sobre las “tecnologías de segunda generación” para la producción de etanol a base de celulosa de cualesquiera otros productos agrícolas (incluso de caña de azúcar), así como tecnologías de gasificación de biomasa. Se discute, asimismo, la sostenibilidad social y ambiental de producción del etanol.

La lectura de este libro con seguridad disipará varios mitos creados alrededor del grande y prometedor programa de etanol en Brasil y su potencial expansión en el mundo.

*Profesor José Goldemberg
Universidad de São Paulo*





Presentación

El interés mundial por el desarrollo de los biocombustibles se empezó a incrementar hacia mediados de la presente década, en el marco de una preocupación más amplia para el desarrollo de fuentes nuevas y más limpias de energía, que permitan avanzar en la superación del paradigma energético actual, basado en los combustibles fósiles. En ese escenario destaca el Brasil, cuyo programa de bioetanol de caña de azúcar presenta resultados interesantes, desde la investigación de variedades de caña de mayor rendimiento, hasta la fabricación de motores que funcionan con cualquier mezcla de gasolina y etanol.

Compartir esa experiencia y las lecciones que de ella se derivan, especialmente con países en desarrollo ubicados en zonas tropicales y subtropicales, fue la principal motivación para que el Presidente Luiz Inácio Lula da Silva le encomendara al Banco Nacional de Desarrollo Económico y Social (BNDES) y al Centro de Gestión y Estudios Estratégicos (CGEE) la elaboración de este libro. Un interés similar motivó la colaboración de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (Cepal) y de la Oficina Regional de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) para América Latina y el Caribe.

La elevación en el precio de los materias primas agrícolas y de los alimentos en los últimos años ha llevado a preguntarse si la demanda de productos agrícolas para la fabricación de biocombustibles no será uno de las causas importantes del incremento en el precio de los alimentos. En ese sentido, sin embargo, es crucial distinguir entre los diferentes sistemas de producción de biocombustibles, considerando tanto aspectos ambientales y energéticos como posibles trade-offs con la producción de alimentos. Es importante entender que los biocombustibles son bastante diferentes entre sí en términos de los impactos y beneficios. Por ejemplo, el etanol de caña es muy diferente del etanol de maíz. Este libro tiene como premisa esa distinción, y argumenta que tanto en términos energéticos

como de efectos sobre la seguridad alimentaria, la producción de biotanol de caña es superior a las demás alternativas.

El libro consta de nueve capítulos y procura cubrir en detalle esa amplia temática. La obra fue coordinada por el BNDES y el CGEE, quienes se encargaron de la producción de los Capítulos 1 a 7 y 9. La Cepal y la FAO supervisaron la producción del Capítulo 8 y proveyeron retroalimentación significativa a todos los demás capítulos.

En el Capítulo 1 se presentan los conceptos de bioenergía y biocombustibles y se revisa su evolución e importancia en la actualidad. En el Capítulo 2 presenta el etanol como combustible vehicular, comentando sus propiedades y desempeño, así como sus aspectos económicos y requisitos de logística para su utilización. En el Capítulo 3 se describen los diferentes procesos de producción de bioetanol a partir de vegetales que contienen azúcares y almidones; se detallan las rutas de producción para caña de azúcar y maíz, presentando los balances de energía y de emisiones de gases de efecto invernadero para cada caso. Los co-productos del bioetanol generados en el procesamiento de la caña de azúcar, como el azúcar y la bioelectricidad, se analizan en el Capítulo 4, mientras que las tecnologías avanzadas para la producción de biotanol de caña de azúcar, como la hidrólisis de residuos y la gasificación, se presentan en el Capítulo 5. Hasta este capítulo los temas son abordados de forma técnica, de una manera que se puede aplicar a otros contextos, con referencias eventuales al caso brasileño. En el Capítulo 6 se presenta la experiencia brasileña en producción de bioetanol, implementada desde 1931 y reforzada en 1975, a través del Programa Proálcool; se revisan su evolución, sus indicadores y sus perspectivas actuales. Por su evidente importancia, en el Capítulo 7 se analiza la sostenibilidad de la producción de bioetanol de caña de azúcar, considerando sus aspectos ambientales, económicos y sociales, con referencia a la experiencia brasileña; además, se incluyen comentarios sobre la certificación de biocombustibles. En el Capítulo 8 se presenta el potencial global para la producción de biocombustibles y se discuten políticas adoptadas para su fomento, evaluando las perspectivas para la formación de un mercado global para el biotanol y sus implicaciones sobre la oferta de alimentos. Finalmente, en el Capítulo 9 se presenta una síntesis de los principales elementos estudiados y se ofrecen algunas recomendaciones.

Por su contenido, se espera que el libro sirva de base para un debate sobre el potencial y las limitaciones de la producción de etanol de caña de azúcar en condiciones adecuadas, especialmente en las regiones en donde ésta se cultiva actualmente. En ese marco, se reconoce la importancia de políticas e incentivos que aseguren el desarrollo de un mercado competitivo para el bioetanol de caña de azúcar, pero sin comprometer la seguridad alimentaria ni los objetivos prioritarios acordados internacionales en materia de reducción de la pobreza y hambre y del manejo sostenible de los recursos naturales.

En ese sentido, el libro destaca que muchos países, especialmente aquellos localizados en regiones tropicales y subtropicales, como es el caso de buena parte de América Latina y el Caribe, disponen de las condiciones adecuadas en cuanto a requerimientos de suelo, agua, radiación solar y disponibilidad de tierras para expandir la producción de caña de azúcar con fines energéticos. Estudios recientes destacan que es posible explotar esas ventajas en condiciones sostenibles, a través de estrategias que promuevan un balance de los costos y beneficios implicados, considerando todas sus dimensiones (económicas, sociales, ambientales, estratégicas etc.), sujetas a un análisis cuidadoso de sus impactos en términos de cambios en el uso de la tierra, patrones de inversión, emisiones de gases de efecto invernadero, flujos de comercio y seguridad alimentaria, tal como ha sido destacado en foros internacionales recientes. Ese proceso se podría beneficiar de la experiencia agrícola, industrial, tecnológica y logística acumulada por Brasil durante los últimos treinta años. Ese acervo de conocimiento representa, sin duda, un importante activo para otros países de la región, que se podría potenciar a partir de la cooperación horizontal.

Para potenciar las ventajas de la producción de biotanol de caña de azúcar es importante lograr una mayor integración y coherencia de las políticas en los niveles nacional e internacional y en las acciones de los sectores público y privado, evitando el desarrollo de instrumentos de política distorsionantes y que limitan las legítimas ventajas comparativas que tienen muchos países para la producción de este biocombustible. Tal como se discute en este libro, es particularmente relevante: (a) desarrollar metodologías comunes para el análisis de ciclo de vida de las emisiones de GEI, reconociendo la importancia de las emisiones directas e indirectas asociadas al cambio de uso de la tierra; (b) adoptar estándares no distorsionantes, acordados internacionalmente, para enfrentar las posibles implicaciones ambientales de la producción de bioenergía; (c) establecer orientaciones para la estimación y reporte de emisiones de GEI en países desarrollados y en desarrollo, el cumplimiento de reglas en el marco de la OMC y la prevención de barreras comerciales; y (d) lograr un mayor vínculo entre las políticas alimentarias y energéticas, de manera que no se comprometa la seguridad alimentaria ni se despoje a los agricultores de las ganancias potenciales que podrían obtener de la producción de biocombustibles.

La agenda del bioetanol se amplía cada día y algunos temas están todavía abiertos a la discusión, quedando fuera del alcance del libro, para ser trabajados en el futuro próximo. Uno de ellos es la globalización del bioetanol. Al igual que en el caso del petróleo, la creación de un mercado mundial de bioetanol implica el desarrollo de un cúmulo de medidas complementarias para asegurar su producción y abastecimiento, aspectos que demandarán la creación de alianzas y el desarrollo de mercados consumidores, con reglas claras en materia de mecanismos de formación precios y de definición de especificaciones de referencia.

Otros temas relevantes son la protección intelectual de los desarrollos biotecnológicos y de mejoramiento de las variedades de caña y las provisiones para mantener la ventaja competitiva de los productores de bioetanol del mundo en desarrollo.

Hoy en día está claro que las políticas relacionadas con los biocombustibles deben guiarse por los siguientes cuatro principios fundamentales:

- a) Orientación dirigida por el mercado, a efecto de reducir las distorsiones en los mercados agrícolas y de biocombustibles y evitar la introducción de restricciones nuevas;*
- b) Sostenibilidad ambiental, buscando el desarrollo de biocombustibles con efectos positivos netos en términos energéticos y de emisiones de gases de efecto invernadero, procurando la protección de los recursos agua y suelo y evitando los daños ambientales en general;*
- c) Promoción del desarrollo económico, valorizando políticas de investigación, desarrollo e innovación que contribuyan a mejorar la eficiencia física y económica de las materias primas y de los procesos de conversión de éstas en biocombustibles; y*
- d) Protección de la población de menores ingresos y de la seguridad alimentaria, dándole la debida atención a los problemas creados por los déficit de alimentos y la dependencia de importaciones de petróleo en los países más pobres y con mayores problemas de hambre.*

Considerando esas orientaciones fundamentales, las instituciones involucradas en la producción de este libro entienden que los programas de producción y uso de bioetanol de caña de azúcar, adecuadamente diseñados y bien conducidos, pueden contribuir a reforzar positivamente las relaciones entre los países y a promover de manera efectiva el desarrollo sostenible de sus sociedades.

*Luciano Coutinho
Presidente, BNDES*

*Lúcia Melo
Presidente, CGEE*

*Alicia Bárcena
Secretaria Ejecutiva, Cepal*

*José Graziano da Silva
Representante Regional de la FAO para
América Latina y el Caribe*

*Luz do sol
que a folha traga e traduz
em verde novo,
em folha, em graça,
em vida, em força, em luz...*
Luz do sol, Caetano Veloso¹

¹ Luz del sol / que la hoja sorbe y convierte / en verde nuevo / en hoja, en gracia / en vida, en fuerza, en luz...



Capítulo 1

Bioenergía y biocombustibles

La conversión de energía solar en energía química, que se realiza en los vegetales durante la fotosíntesis, es uno de los fenómenos más fascinantes de la naturaleza. En la planta iluminada por el sol, la fugaz radiación solar se transforma en productos estables, absolutamente esenciales a la vida en nuestro planeta. Y, desde el principio de la humanidad, fue la simbiosis con el mundo vegetal lo que garantizó el suplemento de alimentos, energía y materias primas de amplio uso, permitiendo, a lo largo de milenios, que aumenten los niveles de bienestar y productividad económica. Tras la breve interrupción en los últimos siglos, durante los cuales la energía solar fosilizada pasó a ser ambiciosamente explotada y utilizada, en forma de carbón, petróleo y gas natural, la energía fotosintética vuelve, lentamente, a ser la protagonista principal. Capaz de mitigar preocupantes problemas ambientales, la energía fotosintética le brinda una nueva dinámica al mundo agroindustrial y ofrece una alternativa efectiva a la necesaria evolución de la sociedad industrial moderna hacia un contexto energético más sostenible y racional. Sin pretender ser la solución exclusiva, la captación y el almacenamiento de energía solar en los vegetales pueden desempeñar un rol destacado en el futuro energético de las naciones. De hecho, como ya decía Melvin Calvin – Premio Nóbel de Química en 1961 por sus descubrimientos sobre la fotosíntesis-, las hojas son verdadera “fábricas silenciosas”.

Este capítulo inicial está dedicado a los conceptos básicos y a la evolución de la bioenergía, particularmente a los biocombustibles, con una perspectiva de largo plazo. Posteriormente, se abordarán más detalladamente la expansión y las perspectivas actuales del mercado brasileño de bioetanol y del mercado mundial de biocombustibles.

1.1 Fundamentos de la bioenergía

En su acepción más rigurosa, la energía es la capacidad de realizar cambios, presentada bajo diferentes formas, como la energía térmica, la energía eléctrica y la energía química, pero siempre representando un potencial para causar transformaciones, ya sean naturales o determinadas por el ser humano. La energía química es la forma de energía que se genera a través de reacciones químicas en las que tienen lugar cambios de composición, transformándose los reactivos en productos, generalmente con liberación de calor. Por ejemplo, la energía química está disponible en los alimentos y en los combustibles, y se usa en los procesos vitales de los animales y de las personas, así como para mover vehículos, entre otros fines.

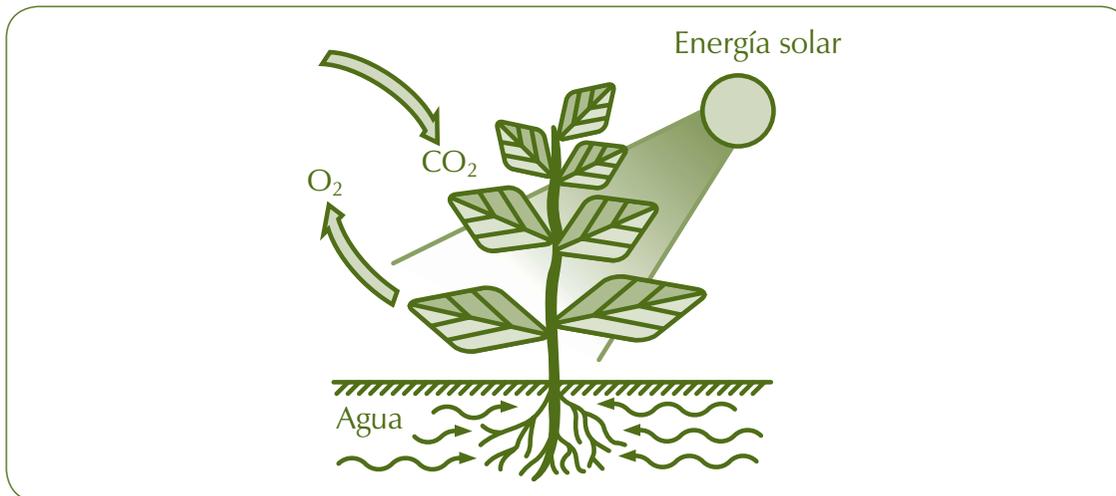
Un caso particular de energía química es la *bioenergía*, que se puede definir como cualquier forma de energía asociada a formas de energía química acumulada mediante procesos fotosintéticos recientes. En general, se denomina *biomasa* a los recursos naturales que poseen bioenergía y que se pueden procesar para obtener formas bioenergéticas más elaboradas y adecuadas para el uso final. Por lo tanto, serían ejemplos de fuentes de bioenergía la leña y los residuos de aserraderos, el carbón vegetal, el biogás resultante de la descomposición anaeróbica de los residuos orgánicos y otros residuos agropecuarios, así como los biocombustibles líquidos, como el bioetanol y el biodiésel, y la *bioelectricidad*, generada por la quema de combustibles como el bagazo de caña y la leña.

En el amplio contexto de la bioenergía, la producción de biocombustibles líquidos sirve para atender particularmente las necesidades de transporte automotor. Para estos fines, además de los biocombustibles, aún no existen, en la actualidad, otras alternativas renovables con madurez tecnológica y viabilidad económica suficientes. Los biocombustibles líquidos se pueden utilizar de manera bastante eficiente en motores de combustión interna que equipan los más diversos vehículos automotores y que se clasifican básicamente en dos tipos, dependiendo de la manera como inicia la combustión. Motores del ciclo Otto, con ignición a chispa, para los cuales el biocombustible más recomendado es el bioetanol; y motores del ciclo Diesel, en los cuales la ignición se logra por compresión y que pueden utilizar con buen desempeño el biodiésel. En ambas situaciones, los biocombustibles pueden ser usados puros o mezclados con combustibles convencionales derivados de petróleo. Es interesante observar que, en los primeros años de la industria automotriz, durante la segunda mitad del siglo XIX, los biocombustibles representaban la principal fuente de energía para los motores de combustión interna, con el uso del bioetanol por Henry Ford y del aceite de maní, por Rudolf Diesel. Estos dos productos se reemplazaron, respectivamente, por la gasolina y el diésel a medida que los combustibles derivados de petróleo pasaron a ser abundantes y baratos, a partir del comienzo del siglo pasado. Los aspectos técnicos asociados al uso de etanol en motores se comentarán en el próximo capítulo.



Automóvil Ford Modelo A (1896) para etanol puro.

Figura 1 – El proceso de fotosíntesis



Fuente: Elaboración de Luiz Augusto Horta Nogueira.

La producción de biomasa, como resultado de la reacción de fotosíntesis, depende esencialmente de la energía solar y de la presencia de agua y dióxido de carbono (CO₂), y tiene lugar en las células vegetales de los estomas de las hojas, según complejos ciclos que pueden ser representados por la siguiente expresión, en la cual agua y dióxido de carbono se combinan para formar una molécula de glucosa (un azúcar simple) y oxígeno.



En esta reacción, en términos energéticos, la formación de 1 Kg de azúcar corresponde a la fijación de cerca de 17,6 MJ (mega joules) de energía solar, equivalente a cerca de medio litro de gasolina. Por balance de masa de esta reacción, se sabe que la síntesis de 1 Kg de glucosa consume cerca de 0,6 Kg de agua y 1,4 Kg de dióxido de carbono, liberando a la atmósfera 1 Kg de oxígeno. Naturalmente, esta agua representa sólo la parte utilizada en la composición del azúcar, pues durante su crecimiento y, en particular, durante la fotosíntesis, se produce evapotranspiración y el vegetal necesita agua en volúmenes centenas de veces mayor que la cantidad fijada en el producto vegetal. Así, la condición fundamental para producir biomasa y, por ende, de bioenergía es la disponibilidad de radiación solar, agua y dióxido de carbono.

Entre estos factores de producción básicos para la producción vegetal, el dióxido de carbono es el menos problemático, pues está bien distribuido en la atmósfera, en concentraciones suficientes para las plantas. Sin embargo, es relevante observar que su concentración muestra, en las últimas décadas, un preocupante crecimiento principalmente asociado al uso intensivo de combustibles fósiles, capaz de incrementar el efecto invernadero en la atmósfera terrestre y el consecuente calentamiento global. En este sentido, los biocombustibles presentan dos importantes ventajas: su uso permite reducir la emisión de carbono a la atmósfera y, además, la producción de biomasa es potencialmente favorecida, dentro de ciertos límites y para algunas especies, por la creciente disponibilidad de dióxido de carbono en la atmósfera.

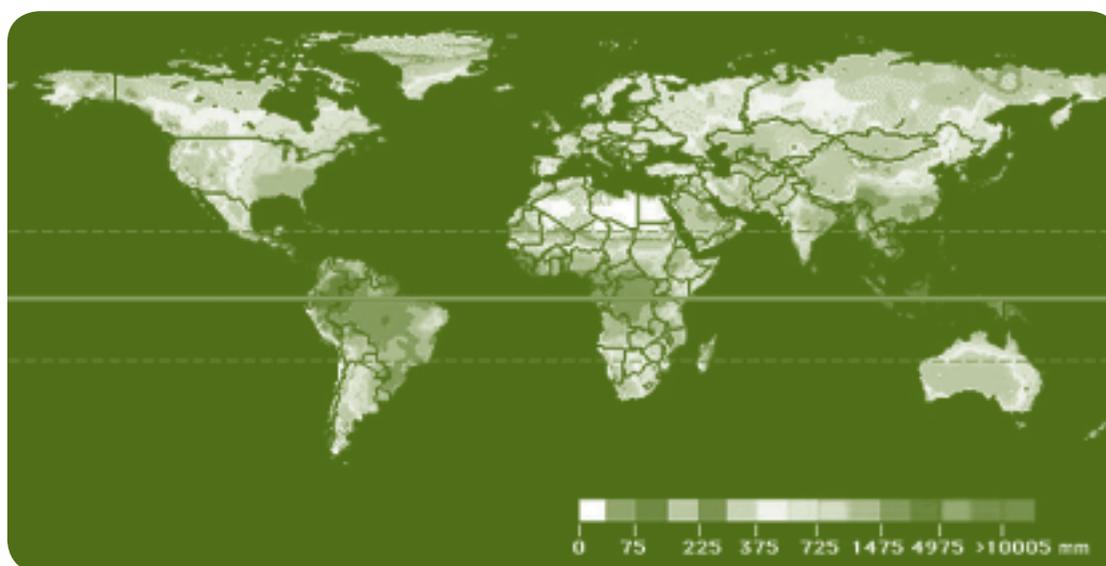
Con relación a la radiación solar, interesa conocer cuál es la fracción utilizada por las plantas y cómo está disponible en el planeta. La fotosíntesis se realiza con absorción de luz por la clorofila en bandas específicas del espectro solar, especialmente para las longitudes de onda entre 400 y 700 nm, región del color rojo. En fisiología vegetal, esta banda se conoce como radiación fotosintéticamente activa (PAR, del inglés *photosynthetically active radiation*) y corresponde, aproximadamente, al 50% del total de la radiación solar. Con relación a la disponibilidad de radiación solar, el factor primordial es la latitud, donde las regiones tropicales reciben más energía solar en comparación con las ubicadas en latitudes mayores. Según el Atlas Solarimétrico Brasileño, un área de un metro cuadrado, ubicada entre 10º y 15º de latitud sur, en la región norte de Brasil, recibe, más o menos, 18,0 MJ/día, mientras que, para una latitud entre 20º y 25º, en la región sur, la misma área recibe 16,6 MJ/día, cerca del 8% menos de energía [Cresesb (2000)]. También asociada a la latitud, la temperatura ambiente es otro factor que influye directamente en la fotosíntesis. Dentro de ciertos límites, mayores

temperaturas favorecen la producción bioenergética, reforzando la ventaja de las regiones más calurosas del planeta en este sentido.

El agua, el último de los factores esenciales para la fotosíntesis, constituye, de hecho, el gran limitante a considerarse para la producción vegetal. La reducida disponibilidad de recursos hídricos con adecuada calidad y su heterogénea distribución sobre los continentes configuran uno de los grandes retos para el desarrollo de muchas naciones. Extensas áreas soleadas en las regiones semiáridas pueden colaborar poco como fuente de biomasa sin ser irrigadas con volúmenes significativos de agua, implicando costos siempre muy elevados y, con frecuencia, dispendios energéticos que dificultan la producción bioenergética. A escala mundial, la irrigación consume actualmente más del 70% de los recursos hídricos utilizados y responde por cerca del 40% de la producción agrícola, transformando el acceso al agua en un tema de enorme prioridad [Horta Nogueira 2008)]. Además, los posibles cambios climáticos derivados del aumento del efecto invernadero en nuestro planeta tienden a modificar de manera preocupante los regímenes pluviales e hídricos, ampliando los riesgos de fenómenos críticos, como sequías e inundaciones, que, evidentemente, afectan la producción vegetal de modo negativo.

Según lo representado en la Figura 2, algunas regiones tropicales, en particular en Sudamérica y África, presentan significativa disponibilidad pluvial. Aunada a una mayor incidencia de energía solar y a temperaturas adecuadas, ésta es una ventaja relevante que configura, en dichas regiones, las condiciones más favorables para producir bioenergía, cuyo fomento debe realizarse en armonía con los bosques naturales y la agricultura ahí existentes.

Figura 2 – Pluviosidad media anual

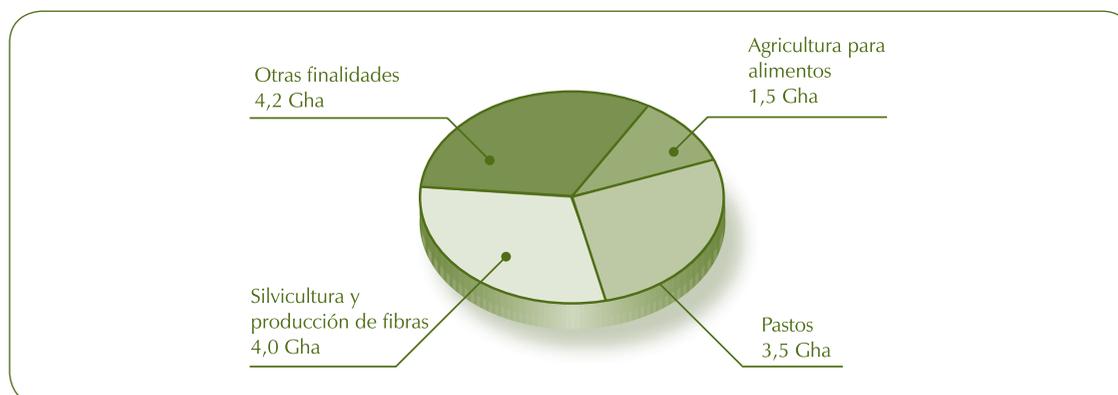


Fuente: FAO (1997).

Además de los factores básicos (luz, agua y dióxido de carbono), otros requisitos importantes para la producción bioenergética son la fertilidad del suelo y la topografía. Los principales nutrientes minerales para el crecimiento vegetal son nitrógeno, fósforo y potasio, pero también es decisiva la disponibilidad, en menores concentraciones, de otros minerales, como boro, manganeso y azufre, así como la presencia de materia orgánica. Adicionalmente, un suelo fértil se caracteriza por la adecuada estructura y porosidad. De modo general, los cultivos bioenergéticos precisan de fertilizantes químicos para lograr niveles satisfactorios de productividad, cuyo mantenimiento depende además del manejo adecuado de los suelos, especialmente la mecanización en las operaciones agrícolas. Con relación a la topografía, la inclinación de las áreas de cultivo no debe ser muy grande, para reducir la incidencia de procesos erosivos, principalmente en los cultivos de ciclo anual, así como para facilitar las operaciones de cultivo y cosecha.

La consideración conjunta de todos estos factores delimita el área potencialmente cultivable para bioenergía y todos los demás usos. Considerando todo el planeta, esa área está estimada en 13,2 mil millones de hectáreas, de las cuales son actualmente utilizadas para producir alimentos para humanos y animales cerca de 1,5 mil millones de hectáreas, correspondientes al 11% del total [Hoogwijk et al. (2003)]. Adelantando un tema que será analizado con más detalles en el Capítulo 8, el Gráfico 1 muestra cómo se distribuyen los usos de la superficie cultivable entre todos los continentes, señalando la existencia de áreas disponibles para expandir las fronteras agrícolas y la eventual producción de bioenergía, en especial en los sitios aún poco explotados o utilizados en forma extensiva, como en pastos de baja productividad.

Gráfico 1 – Usos de la superficie cultivable en la Tierra



Fuente: Elaboración en base a Hoogwijk et al. (2003).

Como uno de los parámetros elementales en sistemas bioenergéticos, es relevante conocer la eficiencia de los cultivos en los procesos de captación y almacenamiento de energía solar. Al determinar cómo y cuánto de la energía solar se transforma realmente en bioenergía y al comprender cómo ocurren las transformaciones y pérdidas de energía, es posible, eventualmente, obtener las condiciones más favorables para el desempeño de las plantas como

colectoras de energía. No obstante, recién en las últimas décadas se están elucidando los mecanismos bioquímicos que permiten que el vegetal sintetice azúcares y otros productos químicos, así como las vías de fijación del carbono identificando sus diferentes etapas, que se desarrollan según una secuencia compleja de reacciones sucesivas, con diversas bifurcaciones y compuestos inestables hasta formar sustancias estables, denominadas *ciclos fotosintéticos*. Tal conocimiento devela una nueva e importante frontera de posibilidades para comprender el comportamiento de las plantas y, eventualmente, incrementar la productividad de las especies de potencial bioenergético.

Los ciclos fotosintéticos de mayor interés son el ciclo de Calvin, o ciclo C3, y el ciclo Hatch-Lack, o ciclo C4, en que la molécula del primer producto estable producido presenta, respectivamente, tres carbonos (ácido fosfoglicérico) o cuatro carbonos (productos como oxalacetato, malato y aspartato) [Hall y Rao (1999)]. Mientras la mayoría de las plantas conocidas utiliza el ciclo C3, en algunas gramíneas tropicales, como caña de azúcar, cebada y sorgo, se identificó el ciclo C4. Tal distinción es relevante para desarrollar sistemas bioenergéticos, en función de la gran diferencia de productividad entre tales ciclos a favor del ciclo C4, que presenta una elevada tasa fotosintética de saturación (absorbe más energía solar), ausencia de pérdidas por fotorrespiración, alta eficiencia en la utilización del agua, mayor tolerancia salina y bajo punto de compensación para el CO₂, es decir, responde mejor bajo menores concentraciones de este gas. En resumen, se puede afirmar que los vegetales con ciclo C4 son los más aptos para la producción bioenergética. La Tabla 1 presenta una comparación de algunos parámetros de interés para estos dos ciclos fotosintéticos [Janssens et al. (2007)].

Tabla 1 – Parámetros de desempeño vegetal para los ciclos fotosintéticos

Característica	Especies C3	Especies C4
Razón de transpiración (kg de agua evaporada por kg sintetizado)	350 – 1000	150 – 300
Temperatura óptima para fotosíntesis (°C)	15 a 25	25 a 35
Lugar de la fotosíntesis	Toda la hoja	Parte externa de la hoja
Respuesta a la luz	Saturada para radiaciones medias	No saturada bajo radiaciones elevadas
Productividad anual media (t/ha)	~ 40	60 a 80
Aptitud climática	Templado a tropical	Tropical
Ejemplos	Arroz, trigo, soya, todas las fructíferas, oleaginosas y la mayoría de los vegetales conocidos	Maíz, caña de azúcar, sorgo y otras gramíneas tropicales

Fuente: Janssens et al. (2007).

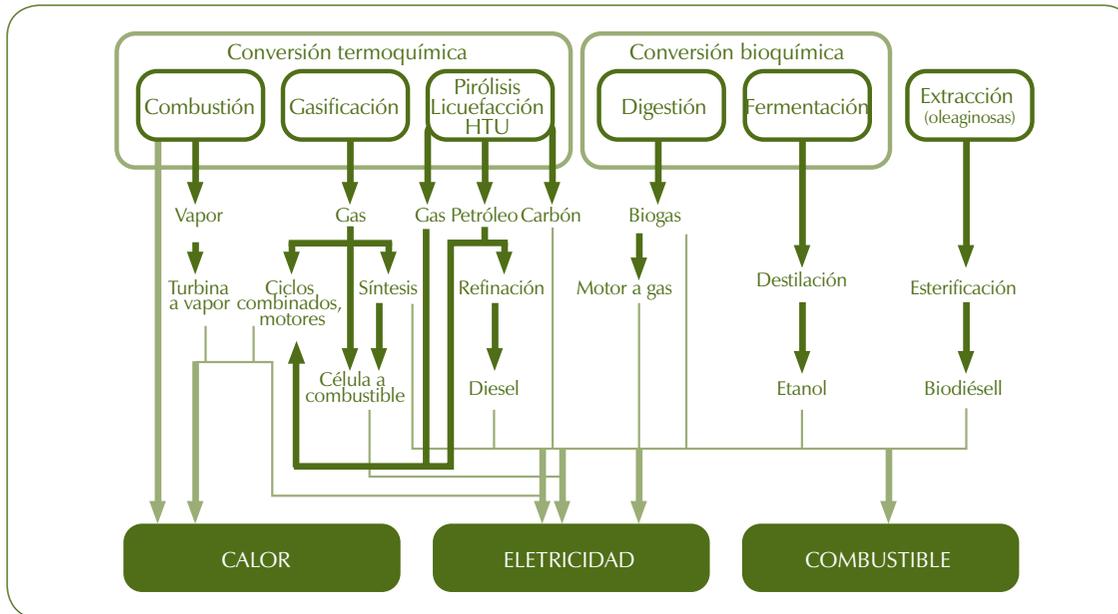
De la radiación solar incidente sobre la Tierra, de 178 mil TW (terawatt o mil millones de kilowatts), se estima que cerca de 180 TW, o el 0,1%, son utilizados en los procesos fotosintéticos, naturales o promovidos por los seres humanos. De este modo, en todo el planeta, son producidos anualmente cerca de 114 mil millones de toneladas de biomasa, en base seca, correspondiendo a, aproximadamente, 1,97 mil millones de TJ (terajoule o mil millones de kilojoules), a su vez equivalentes a 314 mil millones de barriles de petróleo o cerca de diez mil veces el actual consumo mundial de ese combustible fósil. En ese contexto, el promedio de la eficiencia de asimilación de la energía solar es inferior al 1%, aunque vegetales de mayor desempeño, como la caña de azúcar, puedan alcanzar un 2,5% en promedio anual [Smil (1991)]. Naturalmente, estos valores sirven sólo como referencia para entender la magnitud energética de la fotosíntesis. No tiene sentido imaginar la bioenergía como sustituta de todas las formas fósiles de suplemento energético, principalmente en los países de elevada demanda. Este crecimiento vegetal sucede, como se comentó, sobre todo en especies nativas de las regiones tropicales, estimándose que las actividades agrícolas corresponden a cerca del 6% de este total.

Es interesante observar que, dependiendo del vegetal, la energía solar se fija en diferentes sustancias y órganos de acumulación, que determinan las vías tecnológicas posibles de adoptar para convertirlo en biocombustibles para uso final. En la caña de azúcar, por ejemplo, las reservas energéticas se ubican principalmente en los tallos, como sacarosa, celulosa y lignina, siendo tradicionalmente empleadas en la producción de bioetanol y bagazo, pero también las puntas y hojas de la caña presentan creciente interés, a medida que se desarrollan procesos para la utilización de su substrato lignocelulósico. A su vez, en los árboles y otras especies leñosas, el contenido energético está esencialmente en el fuste (tronco más ramas), en forma de celulosa y lignina, siendo empleado básicamente como leña. Las raíces y tubérculos de plantas como la mandioca y la remolacha acumulan almidón y sacarosa, mientras que los frutos y las semillas, como la palma y el maíz, acumulan generalmente almidón, azúcar y aceites vegetales, según cada especie.

Además de definir las vías tecnológicas más adecuadas para convertir la biomasa en biocombustibles, estos aspectos son relevantes para la eficiencia global de captación y utilización de energía solar: para la síntesis de carbohidratos (como celulosa y sacarosa), el vegetal requiere cerca del 60% menos de energía que para la síntesis de grasas o lípidos [Demeyer et al. (1985)], por unidad de masa de producto final, lo que, en principio, hace las vías asociadas al biodiésel comparativamente menos eficientes que las vías del bioetanol, en base a la sacarosa o a la celulosa.

La Figura 3 presenta una síntesis de las diversas vías de conversión que se pueden aplicar para transformar la biomasa en biocombustibles y calor útil. Además de los procesos físicos, puramente mecánicos, para concentración, reducción granulométrica, compactación o reducción de la humedad de la biomasa, son utilizados dos grupos de tecnologías químicas, que modifican la composición de la materia prima para suministrar productos más compatibles con los usos finales: *procesos termoquímicos*, que emplean materias primas con baja humedad y temperaturas elevadas; y *procesos bioquímicos*, desarrollados en ambientes con elevada concentración de agua y temperaturas cercanas a la ambiente.

Figura 3 – Vías tecnológicas para producción de bioenergía



Fuente: Elaborado en base a Turkenburg et al. (2000), apud Seabra (2008).

1.2 Evolución de la bioenergía y de los biocombustibles

La bioenergía, en sus diferentes formas, fue la principal y, en algunas situaciones, la única forma de suplemento energético exógeno utilizada por la humanidad a lo largo de su historia. Desde las primitivas hogueras, hace más de 500 mil años, la biomasa leñosa fue la fuente energética por excelencia y atendía las necesidades domésticas de energía para cocción y calentamiento, además de proporcionar primitivos sistemas de iluminación que empleaban grasas vegetales y animales en quinqués y velas. Posteriormente y durante milenios, la producción cerámica y metalúrgica pasó a representar una demanda importante de bioenergía, consumida en hornos y forjas. Sólo a partir del siglo XVIII, se produjo el agotamiento de las reservas de leña disponibles en gran parte de Europa Occidental y, principalmente, en Inglaterra, factor determinante para comenzar la explotación del carbón mineral y que, junto a la máquina a vapor, fue uno de los hechos desencadenantes de la Revolución Industrial. Si no hubiera sido introducida la energía fósil en forma de carbón mineral, disponible en cantidad abundante y con acceso relativamente fácil en esa época, la historia moderna seguramente hubiera seguido otro rumbo.

Del Brasil colonial, tenemos un registro interesante de un proceso agroindustrial económicamente relevante, proporcionado por la energía de la biomasa. Según relata Antonil (1982), los ingenios de azúcar del Recôncavo Baiano (área alrededor de la Bahía de Todos los Santos), durante el siglo XVII, poseían

as fornalhas, que por sete meses ardem dia e noite, querem muita lenha... (pois) o alimento do fogo é a lenha, e só o Brasil, com a imensidade dos matos que tem, podia fartar, como fartou por tantos anos, e fartará nos tempos vindouros, a tantas fornalhas, quantas são as que se contam nos engenhos da Bahia, Pernambuco e Rio de Janeiro...¹

Es curioso imaginar lo que dichos ingenios hacían entonces con el bagazo de las cañas procesadas – si lo empleaban para alimentar los bueyes de carroza o lo destinaban a otros fines –, pues este subproducto podría constituir una fuente de energía básica para el proceso productivo. Como sucede en las usinas de azúcar y bioetanol de hoy día, que no usan leña y aun así producen excedentes considerables de energía exportable en la forma de bagazo y electricidad.

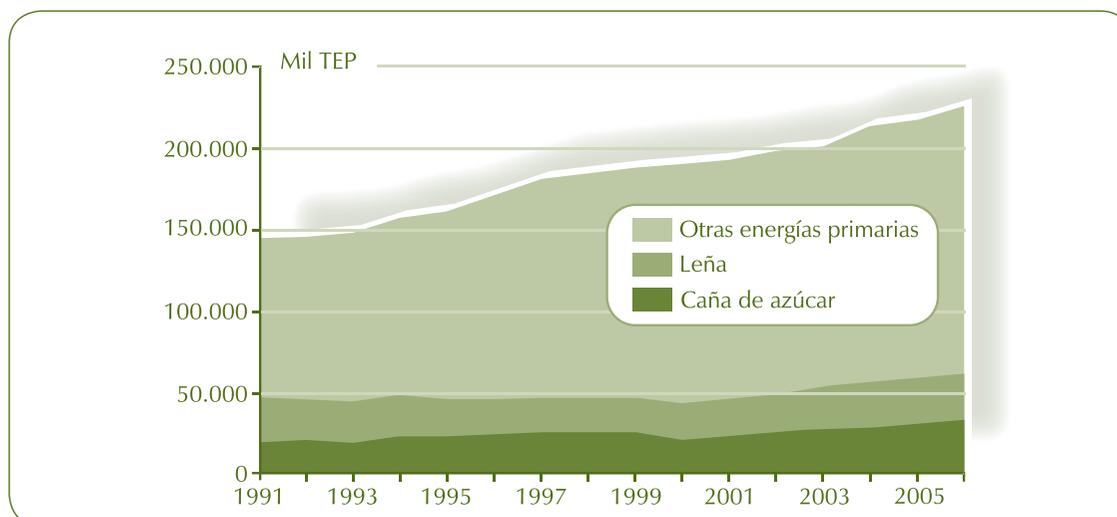
Como en otros países en desarrollo ubicados en regiones tropicales, la amplitud de los recursos bioenergéticos en Brasil ayuda a entender por qué, sólo después de 1915, los combustibles fósiles pasaron a ser utilizados con alguna relevancia en el país, donde la leña permaneció más importante que el petróleo en el suplemento energético hasta 1964 [Dias Leite (2007)]. Sin duda, en muchos ferrocarriles brasileños, que eran casi la única forma de transporte de carga de medianas distancias, así como en las embarcaciones de la Amazonia y en las jaulas (embarcación fluvial a vapor) del Río São Francisco, e incluso para generar energía eléctrica en sistemas aislados utilizando locomotores (conjuntos de máquinas a vapor simples y calderas de pequeña envergadura), la leña era el único combustible empleado hasta mediados del siglo XX. El Gráfico 2 muestra cómo evolucionó la oferta interna de energía en Brasil en las últimas décadas y cuál fue la contribución de la bioenergía, separándose las partes debidas a la caña y a la leña. En 2007, estas fuentes de bioenergía correspondieron, respectivamente, al 16,0% y 12,5% del consumo total de energía en el país [MME (2008)].

Los datos referentes a la bioenergía y, particularmente, a la parte de la leña en las estadísticas energéticas están, para la mayoría de los sectores, determinados en forma indirecta, en base a indicadores como la producción de la industria de papel y pulpa y el número de cocinas a leña. Recientemente, la Empresa de Investigación Energética (EPE) ha revisado esta metodología, buscando mejorar la consistencia de estas informaciones en el caso brasileño. De todos modos, investigaciones del Instituto Brasileño de Geografía y Estadística (IBGE) demuestran que la leña sigue siendo un combustible importante a nivel doméstico. En más de 50 millones de viviendas brasileñas, cerca de un 3,5% cocinan sólo con biomasa y más del 14% usan

¹ N. del T. : “los hornos, que por siete meses queman día y noche, quieren mucha leña... (pues) el alimento del fuego es la leña, y sólo Brasil, con la inmensidad de matorrales que tiene, podría satisfacer, como satisfizo por tantos años, y satisfará en tiempos venideros, a tantos hornos, como son los que se encuentran en los ingenios de Bahía, Pernambuco y Río de Janeiro...”

simultáneamente leña y gas licuado de petróleo [IBGE (2005)]. En la agroindustria (lácteos, carnes, dulces), en general, y en la industria cerámica, especialmente las pequeñas y medianas, la leña es el principal energético, cada vez más producida en base a la silvicultura, en una cadena energética que amplía la generación de valor en el medio rural.

Gráfico 2 – Participación de la bioenergía en la oferta interna de energía en Brasil



Fuente: MME (2007).

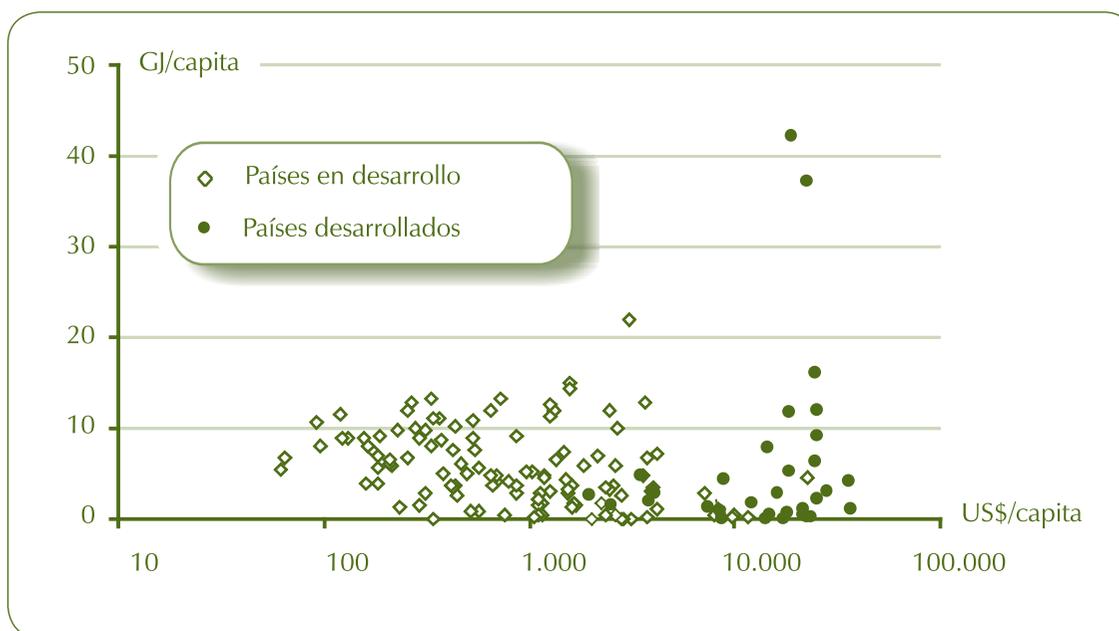
Se estima que las plantaciones forestales para fines económicos en Brasil cubren 4,1 millones de hectáreas, de las cuales cerca de la mitad está destinada a fines energéticos, principalmente para producir carbón vegetal [FAO (2006)]. Esta superficie reforestada se está expandiendo, anualmente, cerca de 250 mil hectáreas y presenta productividades energéticas interesantes, asociadas a un significativo desarrollo de las tecnologías en silvicultura. Aunque una parte importante de la producción de carbón vegetal, efectuada principalmente en la Amazonia occidental, y una parte de la demanda industrial en el interior del noreste todavía se basan en la tala y en la explotación predatoria de formas nativas, de manera general, el uso de leña en Brasil presenta buenos indicadores de sostenibilidad en sus varias vertientes [FAO (2007a)].

En términos globales y actualizando los datos de la Agencia Internacional de Energía (AIE), la demanda de energía comercial (es decir, que pasó por los mercados energéticos), en 2007, fue de 470 millones de GJ, correspondiendo a cerca de 82 mil millones de barriles de petróleo en un año [Best et al. (2008)]. De este consumo total, aproximadamente un 88% se obtuvo de recursos fósiles, especialmente carbón mineral y petróleo. El resto se obtuvo mediante bioenergía, energía hidroeléctrica, energía nuclear y, en menor grado, otras fuentes, como energía geotérmica y energía eólica, destacándose la bioenergía como la más importante entre las energías renovables. La bioenergía, cuyo aporte anual (comercial y no comercial) está estimado en 45 millones de GJ [Best et al. (2008)], se puede encontrar en las cocinas a leña

de gran parte de las viviendas de todo el mundo, en las calderas de muchas agroindustrias y en los tanques de combustibles de un número creciente de vehículos, sobre todo en los países industrializados.

De este modo, los sistemas bioenergéticos presentan una marcada dicotomía entre dos grandes y diferenciados paradigmas. En el primer caso, se encuentran los sistemas tradicionales, practicados hace miles de años, en los cuales la explotación de los recursos de biomasa se realiza bajo un esquema extractivista, sin adecuada valoración económica de los productos y, en general, por medio de sistemas de baja eficiencia y menor productividad, atendiendo a necesidades residenciales y de industrias tradicionales. Como ejemplos de este paradigma está la utilización de leña para la cocción doméstica en el medio rural, práctica común sin impactos notables, y la producción de carbón vegetal asociada a la tala de árboles, dañina y destinada a desaparecer. Como segundo paradigma, se encuentran los sistemas innovadores y modernos de bioenergía, en que la producción se produce generalmente de manera comercial, por medio de tecnologías eficientes, incluso desde el punto de vista ambiental, buscando atender las necesidades de energía de la moderna industria, del sector de transporte y la generación de electricidad. Para este caso, se pueden citar como ejemplos las cadenas bioenergéticas del bioetanol de caña de azúcar, del biodiésel de palma o de sebo, de la bioelectricidad producida con bagazo, licor negro o lixiviado celulósico, entre otras.

Gráfico 3 – Contribución de la bioenergía en función de la renta *per capita*



Fuente: FAO (1998).

Esta doble realidad se evidencia en el Gráfico 3, en el que se relaciona el consumo bioenergético (esencialmente en base a recursos leñosos) *per capita* con la renta *per capita* para diversos países. Si se toman solamente los puntos claros, correspondientes a los países en desarrollo, donde predominan las formas tradicionales de bioenergía, se puede afirmar que el crecimiento de la renta conduce a una reducción de la demanda bioenergética o, dicho de otra manera, que el uso de la bioenergía es una característica de las naciones pobres. Sin embargo, tal hipótesis no se confirma al incluir el análisis los países industrializados, correspondientes a los puntos oscuros, donde, incluso para rentas elevadas, la demanda de bioenergía puede ser relevante, alcanzando niveles superiores a los demás países.

Como ejemplos notables de países de elevado consumo energético y ubicados en regiones frías, de baja insolación y, por lo tanto, de baja productividad fotosintética, pero que logran producir de forma sostenible volúmenes importantes de bioenergía, Suecia y Finlandia obtienen de la fotosíntesis, respectivamente, 19% y 20% de su demanda energética total [Hall y Scrase (2005)]. Como otro ejemplo notable, estudios de los Departamentos de Energía y Agricultura de los Estados Unidos indican para 2030 una producción anual de biomasa para fines energéticos e industriales del orden del mil millones de toneladas (base seca), capaz de reducir en un 30% la demanda prevista de petróleo [DOE/USDA (2005)]. En estos casos, como en la moderna producción de biocombustibles, la bioenergía se concibe bajo modernas tecnologías de producción y conversión, atendiendo a premisas de sostenibilidad y siendo reconocida como una forma renovable de suplemento energético [FAO (2001)].

A escala mundial, por tanto, la evolución futura de la bioenergía presenta una tendencia de reducción de la contribución de las bioenergías tradicionales, a ser mantenidas circunscritas a las situaciones de menor impacto, mientras que las bioenergías modernas se expanden, ocupando el espacio de las fuentes energéticas fósiles. De esta forma, la bioenergía, progresivamente, deja de ser considerada una energía “antigua” y pasa a ser reconocida como una forma energética moderna, competitiva y adecuada, en condiciones de proporcionar una nueva revolución tecnológica. Como profetiza Sachs (2007):

La bioenergía es sólo una parte de un concepto más amplio de lo que se llama desarrollo sostenible, un concepto que se basa en el trípode de biodiversidad, la biomasa y la biotecnología y que puede servir de palanca para el lugar que la biomasa podrá representar en las próximas décadas.



Capítulo 2

Etanol como combustible vehicular

Cualquiera sea su origen – biomasa o procesos petroquímicos y carboquímicos –, el etanol es un combustible, es decir, libera significativas cantidades de calor al quemarse. Sin embargo, el etanol presenta algunas diferencias importantes con relación a los combustibles convencionales derivados de petróleo. La principal es el elevado tenor de oxígeno, que constituye cerca del 35% en masa del etanol. Las características del etanol posibilitan la combustión más limpia y mejor desempeño de los motores, lo que contribuye a reducir las emisiones contaminantes, aun al mezclarlo con la gasolina. En estos casos, actúa como un verdadero aditivo para el combustible normal, mejorando sus propiedades. No obstante la larga experiencia con el etanol como combustible en algunos países, en particular Brasil, es notable como, en diversos países donde el etanol todavía no se utiliza regularmente, subsisten prejuicios y desinformaciones sobre las reales condiciones de uso y las ventajas que se deben asociar a este combustible y aditivo.

El presente capítulo busca presentar aspectos técnicos, económicos y ambientales importantes para el etanol como combustible en motores de combustión interna, ya sea en mezclas con gasolina (etanol anhidro, es decir, sin agua) o puro (etanol hidratado). Se comentan, aquí, las principales características físicas y químicas que definen su especificación y se revisan su adecuación y compatibilidad con los elastómeros y metales de mayor uso en motores, destacando la visión de la industria automovilística con respecto al uso. También se analizan las emisiones atmosféricas asociadas al uso del etanol comparado con la gasolina y se ofrecen algunos comentarios sobre el marco legal para el empleo de etanol para fines vehiculares, así como sobre algunos aspectos económicos, tales como la formación de precios en el mercado de combustibles con etanol y los mecanismos tributarios asociados. Además, se destacan aspectos de la logística del mercado de combustible, considerando la eventual adopción del etanol, aspecto que resulta interesante para los contextos en que se pretende introducir el uso del etanol como combustible.

2.1 Dimensiones técnicas y ambientales del uso del etanol

El etanol, o alcohol etílico, es una sustancia con fórmula molecular C_2H_6O , que puede ser utilizada como combustible en motores de combustión interna con ignición a chispa (ciclo Otto) de dos maneras, básicamente: 1) en mezclas de gasolina y etanol anhidro; o 2) como etanol puro, generalmente hidratado. La Tabla 2 sintetiza las principales características del etanol y de una gasolina típica. Vale observar que estas propiedades no se refieren a una especificación formal, que incluye diversas propiedades y parámetros asociados a la seguridad, al desempeño, a la contaminación y a la agresividad química. En el caso brasileño, las especificaciones, que deben ser atendidas por los productores y respetadas por toda la cadena de comercialización, son definidas por la Resolución ANP 309/2001, para la gasolina con etanol anhidro, y por la Resolución ANP 36/2005, para el etanol anhidro e hidratado, denominados, respectivamente, alcohol etílico anhidro combustible (AEAC) y alcohol etílico hidratado combustible (AEHC), en la legislación brasileña. Según esta legislación, considerando concentraciones en masa, el etanol anhidro debe contener menos del 0,6% de agua, mientras que para el etanol hidratado esta concentración debe estar entre el 6,2% y 7,4%. Expresados como proporción en volumen a 20° C, estos valores corresponden, respectivamente, a una concentración máxima del 0,48% para el etanol anhidro y una franja del 4,02% a 4,87% para el etanol hidratado.

Tabla 2 – Propiedades de la gasolina y del bioetanol

Parámetro	Unidad	Gasolina	Etanol
Poder calorífico inferior	kJ/kg	43.500	28.225
	kJ/litro	32.180	22.350
Densidade	kg/litro	0,72 – 0,78	0,792
Octanaje RON (<i>Research Octane Number</i>)	–	90 – 100	102 – 130
Octanaje MON (<i>Motor Octane Number</i>)	–	80 – 92	89 – 96
Calor latente de vaporización	kJ/kg	330 – 400	842 – 930
Relación aire/combustible estequiométrica		14,5	9,0
Presión de vapor	kPa	40 – 65	15 – 17
Temperatura de ignición	°C	220	420
Solubilidad en agua	% en volumen	~ 0	100

Fuente: API (1998) y Goldemberg y Macedo (1994).

En Brasil, desde hace varias décadas, los únicos combustibles que se expenden en todas las gasolineras para motores de ignición a chispa son:

- gasolinas regular y *premium*, con octanaje mediano (entre los métodos RON y MON) mínima de 87 y 91, respectivamente, ambas siempre con concentración de etanol anhidro establecida entre 20% y 25%, de acuerdo a la decisión del gobierno federal, utilizadas en los vehículos nacionales e importados con motores a gasolina, inclusive los modelos de lujo.
- etanol hidratado, con un octanaje mediano superior a 110, usado en vehículos adaptados para tal uso, que pueden usar motores propios para este combustible o motores *flex-fuel*, capaces de usar cualquier mezcla de etanol hidratado y gasolina (con 20 a 25% de etanol).

El etanol hidratado puro debe ser usado en motores fabricados o adaptados específicamente para este fin, en particular adoptando índices de compresión más elevados, buscando utilizar adecuadamente el octanaje más alto del etanol frente a la gasolina y obtener ganancias de eficiencia del 10%. En otras palabras, el mayor octanaje del etanol permite que los motores obtengan más energía útil del calor del combustible comparativamente a la gasolina. Otros cambios deben ser efectuados en el sistema de alimentación de combustible y en la ignición, para compensar las diferencias en la relación aire-combustible y otras propiedades. Además, debe haber algunos cambios de materiales en contacto con el combustible, como tratamiento anticorrosivo de las superficies metálicas de los tanques, filtros y bombas de combustible y sustitución de tuberías o adopción de materiales más compatibles con el etanol. Actualmente, tras décadas de perfeccionamiento de motores especialmente fabricados para etanol, la tecnología automotriz ha evolucionado lo suficiente como para permitir que los vehículos a etanol puro hidratado tengan desempeño, maniobrabilidad, condiciones de arranque en frío y durabilidad absolutamente similares a los motores a gasolina, especialmente en países con inviernos moderados.

Con la intensa utilización de la electrónica aplicada a sistemas avanzados de control de mezcla y de ignición, a partir del 2003 se lanzaron comercialmente en Brasil vehículos con motores flexibles (*flex-fuel*), capaces de utilizar, sin cualquier interferencia del conductor, gasolina (con 20% a 25% de etanol), etanol hidratado puro o mezclas de esos dos combustibles en cualquier proporción, según exigencias de eficiencia y maniobrabilidad y atendiendo a los límites legales de emisiones de gases de escape [Joseph Jr. (2007)]. Los vehículos equipados con estos motores ya representan la mayoría de los vehículos nuevos vendidos en Brasil a partir de 2005 y, desde entonces, están perfeccionándose en términos de desempeño y funcionalidad de los sistemas de arranque en frío. Actualmente, existen más de 60 modelos diferentes, fabricados por diez montadoras de origen estadounidense, europeo y japonés, instaladas en el país. Obsérvese que esta concepción de vehículo flexible, como la adoptada en Brasil, permite que el usuario elija, según su conveniencia, el combustible que usará, desde 100% de etanol hidratado hasta una gasolina con 20% a 25% de etanol. En Estados Uni-

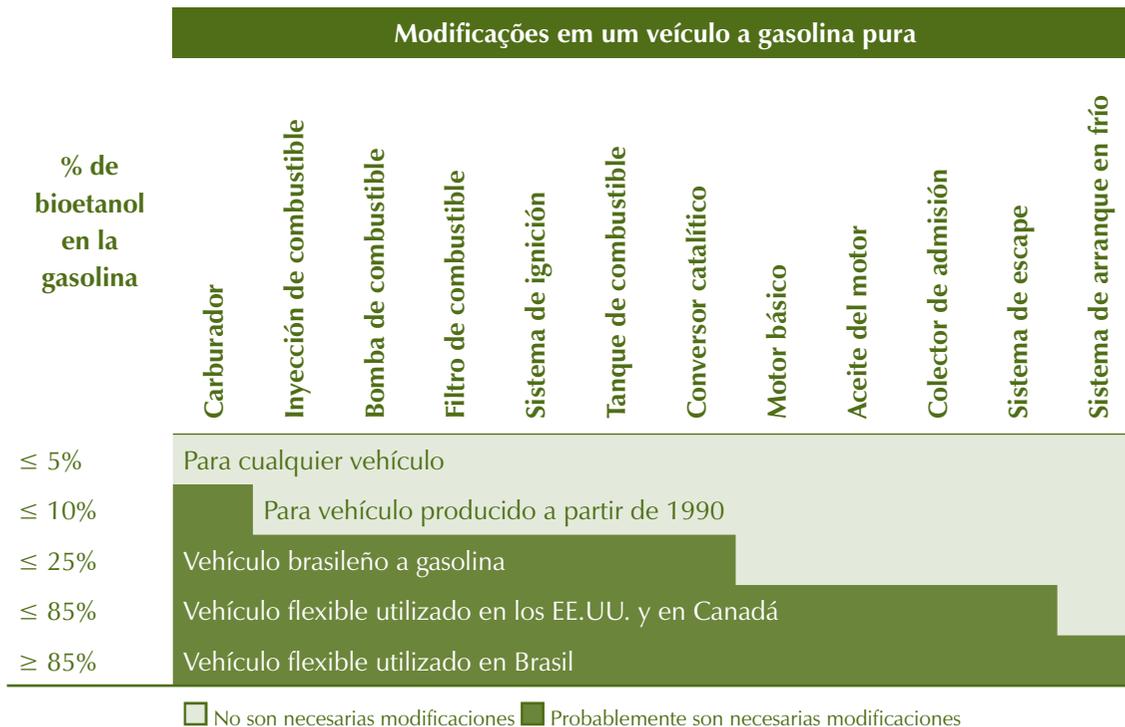
dos, en Canadá o en Suecia también se comercializan vehículos con motores flexibles, pero bajo otro concepto, operando en franjas de concentraciones de etanol que van desde la gasolina pura, sin etanol, hasta una mezcla con el 85% de etanol anhidro y el 15% de gasolina, producto que está disponible en cantidad creciente, pero todavía limitada, de gasolineras, con la sigla E85.

No obstante, la manera más sencilla, frecuente e inmediata para utilizar el etanol como combustible es a través de las mezclas con gasolina en los vehículos ya existentes en el país, sin necesidad de efectuar modificaciones en los motores. Esta es la situación de mayor interés, tanto para los países en desarrollo, los cuales pueden producir etanol y dependen de importaciones de combustibles para su abastecimiento, a un costo cada vez más elevado, como para los países industrializados que tienen, actualmente, un potencial limitado de producción interna de etanol, pero que pueden diversificar su matriz de combustibles líquidos, agregando a la producción local el etanol importado de regiones con condiciones favorables para producir este biocombustible. En este sentido, es necesario verificar las implicaciones para adoptar las mezclas de etanol y gasolina sobre el desempeño de los motores, la maniobrabilidad y la durabilidad de los vehículos y el impacto ambiental asociado.

En Brasil, desde la década de 1980, la concentración de etanol anhidro en toda la gasolina comercializada en las gasolineras se mantuvo por encima del 20%. En Estados Unidos, que también pasó a utilizar mezclas etanol-gasolina en esa misma década, esta concentración estuvo limitada al 10%, también conocido como E10, y fue considerado por la industria automovilística como el modelo del máximo de mezcla a adoptar sin necesidad de modificaciones de materiales, componentes o recalibraciones del motor. Recientemente, diversos países, como China, Tailandia, Australia y Colombia, adoptaron el E10 como punto de partida para introducir el uso del etanol en los mercados. En esas concentraciones el etanol actúa como un aditivo que mejora la calidad de la gasolina (*octane booster*) y reduce emisiones contaminantes, sustituyendo el tetraetilo de plomo y otros aditivos oxigenantes que presentan restricción ambiental, como el MTBE, cuyo uso está prohibido en muchos países. La experiencia de diversos países con el E10 permite afirmar que se puede introducir esta mezcla para abastecer el parque vehicular existente sin mayores modificaciones.

La Tabla 3 muestra como varían las exigencias de modificaciones en los vehículos en función de la concentración de etanol en la gasolina [Joseph Jr. (2005)]. Obsérvese que los vehículos a gasolina utilizados en Brasil (fabricados localmente o importados) están preparados para utilizar concentraciones medias de etanol y ya cuentan con algunas modificaciones con relación a un vehículo para gasolina pura. En el caso de los motores flexibles, se verifica que la concepción estadounidense, que utiliza mezclas con hasta 85% de etanol en la gasolina, es más sencilla que la brasileña, pues no viene equipada con el sistema auxiliar de arranque en frío y no permite que los motores operen incluso con etanol puro. No obstante, con el desarrollo de sistemas de inyección más avanzados, en un futuro próximo no habrá necesidad de estos sistemas auxiliares, y la configuración adoptada en Brasil podrá ser simplificada.

Tabla 3 – Exigencias de modificaciones en vehículos para diferentes concentraciones de bioetanol en la gasolina



Fuente: Elaborado en base a Joseph Jr. (2005).

Cuando se mezcla el etanol a la gasolina, resulta un nuevo combustible, con algunas características distintas del valor determinado por la ponderación directa de las propiedades de cada componente, a causa del comportamiento no lineal de ciertas propiedades. Es necesario recordar que, mientras que el etanol es una sustancia química simple, la gasolina es siempre una mezcla con más de 200 diferentes especies de hidrocarburos derivados del petróleo. A continuación se comentan las principales propiedades de las mezclas gasolina/etanol y su comportamiento en aspectos ambientales.

Octanaje

Octanaje es la medida de resistencia de un combustible a la auto-ignición y a la detonación, evaluada por los métodos Motor (MON) y Research (RON) respectivamente,, que permite inferir el comportamiento de un motor alimentado con este combustible, en condiciones de carga elevada o carga constante. El etanol es, reconocidamente, un excelente aditivo antidetonante y mejora el octanaje de la gasolina-base de modo sensible. Exactamente por tener toda la gasolina mezclada con etanol, Brasil fue uno de los primeros países del mundo en abolir totalmente el tetraetilo de plomo y sólo adoptó el MTBE de modo ocasional y lo-

calizado, durante los años 1990. Estos aditivos antidetonantes todavía se emplean en algunos países, pero ocasionaron problemas ambientales y están en progresivo desuso. Como se puede observar por los valores presentados en la Tabla 4, la adición de etanol afecta más al octanaje RON que al MON y se constata, además, una gran influencia de la composición de la gasolina-base y, por lo tanto, de su octanaje original sobre el incremento del octanaje, debido al etanol. Como regla general y de clara importancia, cuanto más bajo es el octanaje de la gasolina-base, más significativa es la ganancia debido al etanol.

Tabla 4 – Efecto del bioetanol en el octanaje de la gasolina-base

Composición de la gasolina-base			Incremento del octanaje con							
			5% de bioetanol		10% de bioetanol		15% de bioetanol		20% de bioetanol	
Aromáticos	Olefínicos	Saturados	MON	RON	MON	RON	MON	RON	MON	RON
50	15	35	0,1	0,7	0,3	1,4	0,5	2,2	0,6	2,9
25	25	50	0,4	1,0	0,9	2,1	1,3	3,1	1,8	4,1
15	12	73	1,8	2,3	3,5	4,4	5,1	6,6	6,6	8,6
11	7	82	2,4	2,8	4,6	5,5	6,8	8,1	8,8	10,6

Fuente: Carvalho (2003).

Volatilidad

Para que un combustible se queme correctamente, es necesario que esté bien mezclado con el aire. Por lo tanto, la facilidad de un combustible líquido en vaporizarse es una propiedad importante, que afecta directamente a diversos parámetros de desempeño del vehículo, como condiciones de arranques en frío o en caliente, aceleración, economía de combustible y dilución del aceite lubricante. Exactamente por esto, los combustibles derivados de petróleo deben presentar una composición equilibrada entre fracciones livianas y pesadas, para producir una curva de destilación, según la cual el producto comienza a vaporizarse a temperaturas relativamente más bajas y termina a temperaturas mucho más elevadas que la temperatura ambiente. La adición de etanol tiende a reducir la curva de destilación, especialmente en la primera mitad, afectando la temperatura T50, correspondiente al 50% de la masa evaporada, aunque las temperaturas inicial y final de destilación estén poco afectadas. En este sentido, agregar etanol tiene poca importancia para el comportamiento de los motores.

No obstante, una propiedad importante y relacionada a la volatilidad – la presión de vapor – es significativamente afectada al agregarse etanol. La presión de vapor determina el nivel de las emisiones evaporativas y la posibilidad de que ocurra formación de vapor en las líneas de alimentación de combustible, un problema atenuado con la actual adopción de bombas de combustible en el tanque, como sucede en la gran mayoría de los vehículos modernos. Es interesante constatar que, aunque la presión de vapor de la gasolina pura sea superior a la del etanol puro, como se presentó en la Tabla 2, la adición de etanol a la gasolina eleva la presión de vapor de la mezcla. Este incremento, típicamente, presenta un máximo alrededor de un

5% en volumen de etanol en la gasolina, reduciéndose lentamente a medida que crece la concentración de etanol. A título de ejemplo, se puede mencionar determinada composición de gasolina que, al recibir el 5% de etanol, la presión se eleva a 7 kPa, mientras que, con el 10% en volumen, esta presión alcanza 6,5 kPa [Furey (1985)]. Este efecto puede corregirse sin dificultades, al ajustar la composición de la gasolina-base, para garantizar que la mezcla cumple con las especificaciones. En Brasil y otros países que usan etanol en la gasolina, la presión de vapor está siendo especificada en niveles similares a la gasolina pura. En pocas palabras, el efecto del etanol sobre la presión de vapor puede ser controlado sin mayores dificultades.

Desempeño

Como las mezclas gasolina/etanol se pueden ajustar adecuadamente para atender a las especificaciones típicas de una gasolina pura, no existen, necesariamente, problemas de desempeño y maniobrabilidad, siempre que se cumpla con los requisitos de calidad especificados para los combustibles. No obstante, en comparación con la gasolina pura, una gasolina con un 10% de etanol necesita el 16,5% más de calor para vaporizarse totalmente, lo que puede ser una dificultad real en temperaturas muy bajas [TSB (1998)]. Por otro lado, el mayor calor de vaporización de la gasolina mezclada con etanol es una de las razones principales para que la eficiencia de un motor que utiliza este combustible aumente entre 1% y 2% con relación al desempeño de la gasolina pura. De este modo, aunque una gasolina con un 10% de etanol contenga 3,3% menos energía por unidad de volumen, el efecto final sobre el consumo de combustible es menor y depende de las condiciones particulares de uso [Orbital (2002)].

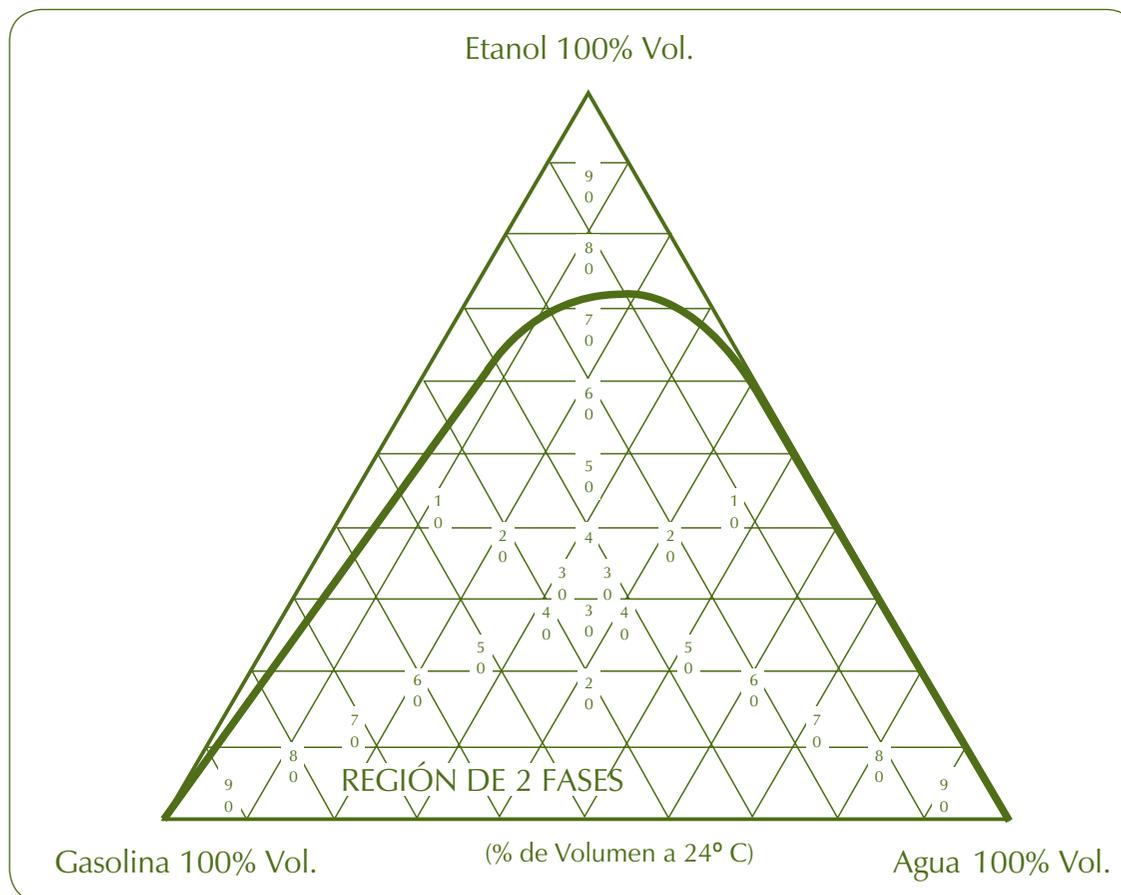
Este punto es relevante: en concentraciones de hasta 10%, el efecto de la adición de etanol sobre el consumo de los vehículos es inferior a la variación de consumo observada entre diferentes automovilistas y, para efectos prácticos, un litro de gasolina mezclada con etanol produce prácticamente los mismos efectos que un litro de gasolina pura [Salih y Andrews (1992) y Brusstar y Bakenhus (2005)]. Ya para concentraciones más elevadas, como 25% de etanol, correspondiendo a un contenido energético en volumen un 10% inferior, se observa un promedio del aumento en el consumo del 3% a 5% sobre la gasolina pura. Estos resultados, confirmados en muchos ensayos de campo, indican como el etanol, aunque presente menor poder calorífico, permite mejorar la eficiencia del motor, gracias a la menor temperatura en la ignición y al mayor volumen de los productos de combustión. Con el etanol puro hidratado, este efecto es aún más sensible, siempre que el motor esté correctamente adaptado para este combustible, incrementando el índice de compresión: aunque presente un poder calorífico cerca del 40% inferior al de la gasolina, el efecto final en los motores actuales es un consumo de 25% a 30% más elevado que la gasolina.

A mediano plazo, la adopción de conceptos más avanzados de ingeniería de motores, como la inyección directa de combustible, índices de compresión más elevados y sistemas de turboalimentación inteligentes, podrá provocar importantes beneficios en el consumo específico de los motores a etanol hidratado, incluso superando los valores obtenidos con gasolina pura [Szwarc (2008)].

Separación de fases

La posibilidad de que suceda una separación de fases acuosas en una mezcla etanol/gasolina es, a menudo, mencionada como un problema para adoptar el etanol combustible. Hay un temor de que, de algún modo, el agua sea introducida con el etanol o se condense en el tanque de combustible de un vehículo, separándose del fondo y causando problemas para el funcionamiento normal del motor. En realidad, este problema tiende a ser tanto menor cuanto mayor sea el agregado de etanol a la gasolina. Mientras que la gasolina pura prácticamente no absorbe agua, el etanol anhidro tiene total afinidad con el agua, y las mezclas gasolina/etanol presentan una capacidad de disolver agua directamente proporcional a la concentración alcohólica, como se indica en el diagrama ternario presentado en la Figura 4. Cuanto más elevada es la concentración de etanol en la gasolina, más ancha es la franja que define la región donde ocurre total solubilidad, como se observa en la parte superior del diagrama. En temperaturas muy bajas, este efecto es menos intenso, pero, de todos modos, el etanol siempre actúa como un co-solvente entre la gasolina y el agua, reduciendo los riesgos de separación de la fase acuosa de la gasolina.

Figura 4 – Solubilidad de agua en mezclas gasolina/etanol



Fuente: CTC (1998).

La posibilidad de que la gasolina con etanol presente una solubilidad razonable para el agua y el hecho de que haya adecuadas temperaturas en Brasil explican como funcionan sin problemas los vehículos flexibles en ese país, en donde se los pueden abastecer con cualquier mezcla de gasolina (con 20% a 25% de etanol) y etanol hidratado, cuya agua no se separa exactamente gracias al alcohol previamente contenido en la gasolina. Si la gasolina brasileña no contuviera una concentración elevada de etanol anhidro, la mezcla con etanol hidratado probablemente conduciría a una separación de fases, especialmente en condiciones con temperaturas inferiores a 18°C. Por lo tanto, no tiene sentido imaginar que el agregado de etanol anhidro a la gasolina causa problemas de separación de fases – en verdad, reduce esos problemas.

Compatibilidad de materiales

Algunos materiales plásticos más antiguos, utilizados en sellados, mangueras y filtros, como la goma natural y la goma sintética butílica, tienden a degradarse más rápidamente con el etanol. Sin embargo, desde 1980, estos materiales se están reemplazando por elastómeros fluorados, lo que solucionó este problema. La Tabla 5 muestra los resultados de pruebas de durabilidad conducidas por el ejército británico [Orbital (2002)], confirmando la adecuación al etanol de la mayoría de los plásticos usados actualmente. También, en este sentido, una empresa de petróleo presenta los siguientes comentarios a sus consumidores:

Según la experiencia, no hay un problema significativo de compatibilidad de gasolinas con oxigenados y elastómeros en coches más antiguos. No aumentaron los problemas al introducirse la gasolina con etanol o MTBE en áreas metropolitanas en 1992, incluso en las regiones con mayores proporciones de coches antiguos en la flota [Chevron (2006)].

Tabla 5 – Durabilidad de materiales plásticos en bioetanol

Plástico	Durabilidad
Polietileno convencional	Aceptable
Polipropileno	Aceptable
Polimetilpenteno (PMP)	Aceptable
Policarbonato	Aceptable
Cloruro de vinilo (PVC)	Aceptable
Polietileno de alta densidad	Excelente
Politetrafluoretileno (Teflon)	Excelente

Fuente: Orbital (2002).

Con relación a los metales, en condiciones normales de uso, estos materiales están siempre sujetos a la corrosión, es necesario seleccionar de forma adecuada y, eventualmente, utilizar revestimientos protectores. Los metales considerados de baja resistencia al etanol y sus mezclas son las aleaciones para fundición por presión (tipo Zamac) y algunas aleaciones de

aluminio [Owen y Coley (1995)]. La agresividad del etanol depende de la concentración alcohólica en la gasolina y está asociada, particularmente, a la presencia de agua, ácidos orgánicos y contaminantes. Para mezclas de gasolina con 10% de etanol, el desgaste de componentes metálicos fue bastante estudiado y se lo considera irrelevante, comparado a la gasolina normal. En concentraciones más elevadas, hay un efectivo temor de que haya problemas de compatibilidad y corrosión. Esto explica por que, durante los años 1970, cuando la gasolina brasileña pasó a incorporar etanol con niveles más elevados, se introdujeron, paulatinamente, diversos cambios en los sistemas de combustible de los vehículos. Los procesos de recubrimiento metálico y de protección como niquelado y cromado son comunes en los tanques de combustible de los automóviles brasileños, y es también creciente el uso de materiales plásticos para estos componentes.

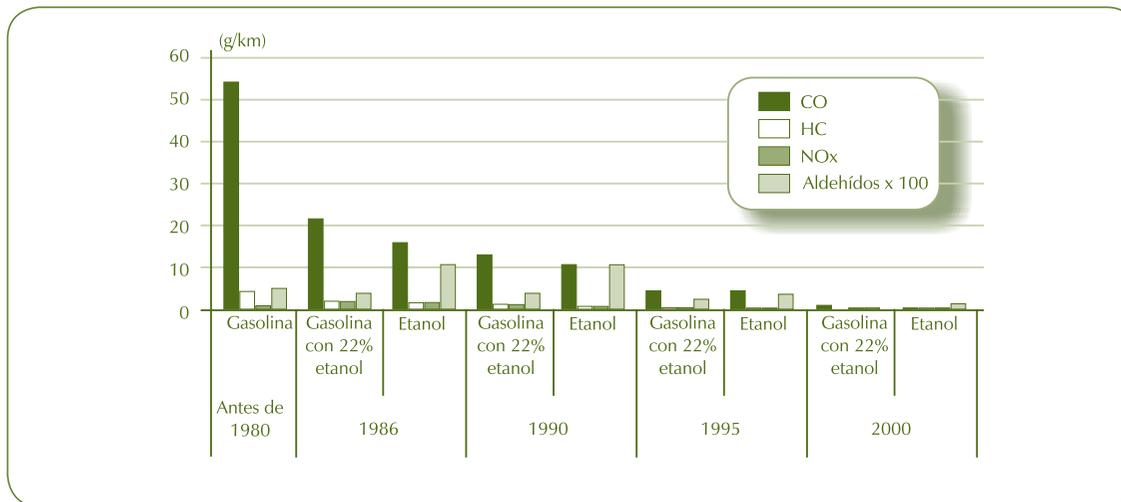
La manera más eficaz de reducir eventuales problemas de compatibilidad de materiales con etanol es a través de la adecuada especificación, estableciendo niveles máximos de acidez total, pH, conductividad eléctrica, así como límites para algunos iones (cloruros, sulfatos, hierro, sodio y cobre). Por eso es esencial, para el éxito de un programa de etanol combustible, la correcta definición y la estricta observación de la especificación de este biocombustible. En este sentido, es relevante la iniciativa de armonizar las especificaciones del etanol combustible, como está siendo conducida por un esfuerzo conjunto de Brasil, Unión Europea y Estados Unidos, con buenos resultados [Gazeta Mercantil (2008)].

Emisiones de gases de escape

Como consecuencia de la composición, la combustión de la gasolina con etanol y del etanol puro en motores, en comparación a las gasolinas típicas, produce menores emisiones de monóxido de carbono (CO), óxidos de azufre (SO_x), hidrocarburos y otros compuestos contaminantes. Al mismo tiempo, se elevan los aldehídos (compuestos del tipo R-CHO) y, dependiendo de las características del motor, los óxidos de nitrógeno (NO_x). Normalmente, los límites legales de emisión para vehículos se cumplen totalmente, y los beneficios resultantes del uso del etanol son un hecho bastante conocido.

Es interesante observar que la motivación básica para la adición de etanol en la gasolina de diversas regiones de Estados Unidos, a partir de los años 1990, fue exactamente la mejora de la calidad del aire, asociada a la oxigenación promovida por el etanol [Yacobucci y Womach (2002)]. Como los modelos más antiguos son más contaminantes, cuanto más antiguo es el motor (es decir, con carburador y sin catalizador), más significativo es el potencial de ventajas ambientales proporcionadas por el etanol frente a la gasolina. Además, es relevante comentar que el etanol daña menos el catalizador, en comparación a la gasolina, principalmente por el hecho de contener menos contaminantes, como el azufre. En el Gráfico 4, se muestra cómo la emisión de los vehículos producidos en Brasil fue reducida a lo largo de las últimas décadas, a causa del desarrollo tecnológico de los motores y de la introducción del etanol [Ibama (2006)]. En esta figura, se puede observar que los valores para los aldehídos están multiplicados por 100, ya que son bastante reducidos.

Gráfico 4 – Evolución de las emisiones de vehículos nuevos en Brasil



Fuente: Elaborado en base a Ibama (2006).

En algunos estudios, se señala una preocupación especial con las emisiones de aldehídos asociadas al uso de etanol. En efecto, estas sustancias presentan potencial cancerígeno y pueden presentarse en concentraciones más elevadas en el escape de los motores que utilizan etanol que en aquellos a gasolina pura. Sin embargo, los catalizadores – equipos instalados en los vehículos estadounidenses a partir de 1975 y que pasaron a ser progresivamente utilizados en todos vehículos comercializados en otras regiones del mundo y en Brasil a partir de 1997 – reducen estos contaminantes a niveles tolerables, sin agravantes. Actualmente, la emisión media de aldehídos en los vehículos nuevos brasileños es de 0,014 g/km para los vehículos a etanol y 0,002 g/km para los vehículos a gasolina (la gasolina de referencia para las pruebas de emisión contiene un 22% de etanol anhidro), inferiores al actual límite de 0,030 g/km establecido por la legislación ambiental brasileña, así como al futuro límite de 0,020 g/km, que pasará a regir en 2009 [Ibama (2006)]. Diversas mediciones en ciudades estadounidenses, comparando la calidad del aire antes y después de la introducción más masiva de 10% de etanol en la gasolina, no indicaron cualquier incremento significativo en la concentración atmosférica de aldehídos [Andersson y Victorinn (1996)]. En rigor, la mayor fuente de aldehídos en las áreas urbanas proviene de los motores diésel [Abrantes et al. (2005)] y parecen ser bastante conclusivas las observaciones de un estudio integral desarrollado en Australia, según el cual la adopción del 10% de etanol en la gasolina permite disminuir en un 32% las emisiones de CO, en un 12% las emisiones de hidrocarburos y en más de 27% las emisiones de aromáticos, reduciendo el riesgo carcinogénico en un 24% [Apace (1998)].

Uso del etanol en Motores Diésel

Con relación al uso de etanol en camiones y autobuses, es interesante observar que los mismos factores que hacen al etanol especialmente apto a ser utilizado en motores con ignición

a chispa lo convierten en poco atractivo para los motores con ignición por compresión (ciclo Diesel), generalmente empleados en esos vehículos. En este caso, es necesario colocar aditivos al etanol de manera intensa, para reducir su octanaje, ampliar su índice de cetano y su poder lubricante y, eventualmente, utilizar co-solventes, lo que lo hace poco viable en términos económicos. No obstante, gracias a los efectos ambientales positivos, el uso de etanol en motores diésel optimizados para este biocombustible ya es una realidad, en particular en Suecia, donde, hace más de 18 años, diversos autobuses en uso regular en Estocolmo utilizan etanol hidratado con cerca de un 5% de aditivo en motores diésel [Ethanolbus (2008)]. Los resultados señalados por los 600 autobuses que operan en ocho ciudades suecas son estimulantes. Recientemente, se lanzó la tercera generación de motores comerciales a etanol con 9 litros de desplazamiento, 270 caballos de potencia y un elevado índice de compresión (28:1), atendiendo a las nuevas normas europeas de emisiones vehiculares (Euro 5) [Scania (2007)], lo que justifica un programa que promueve el uso del etanol para transporte colectivo en diez metrópolis de todo el mundo, en escala experimental, el Proyecto BEST (Bioethanol for Sustainable Transport) [BEST (2008)].

El uso del etanol en motores diésel está siendo promovido, esencialmente, por sus beneficios ambientales, pues, aunque la eficiencia térmica con etanol se mantenga similar a la del diésel (aproximadamente un 44%), estos motores no permiten utilizar la ventaja de su mayor octanaje y presentan consumos con etanol 60% superiores al observado con diésel, a causa de la diferencia de poderes caloríficos entre estos combustibles.



Autobuses con motor ciclo Diesel a etanol hidratado en Madrid.

En Brasil, en los años 1980, se desarrollaron diversas investigaciones sobre el uso de etanol en motores de mayor envergadura, ya sea colocando aditivos al etanol para usar en motores diésel, o convirtiendo estos motores a ciclo Otto, es decir, adaptando el sistema de alimentación de combustible e introduciendo sistemas de ignición a chispa, acumulando un razo-

nable acervo de estudios, pero sin resultados concluyentes [Sopral (1983)]. En la actualidad, es comprensible el interés del propio sector sucroalcoholero de desarrollar esta aplicación para el biocombustible que produce. Se estima que existen hoy cerca de cien mil motores diésel en operación en los camiones y en la maquinaria agrícola de las plantas brasileñas, que, mediante el uso de etanol sustituyendo el diésel, podrían reducir a la mitad los gastos con combustible. En este sentido, el empleo de etanol en motores con inyección electrónica y elevado índice de compresión parece ser la tendencia predominante [Idea (2008)].

La visión de la industria automovilística y de los usuarios

Como una última observación sobre la utilización de etanol como aditivo en la gasolina y sus implicaciones sobre el desempeño y la durabilidad de los motores y vehículos, vale la pena mencionar el “Worldwide Fuel Chart” (WWFC) que contiene un conjunto de especificaciones para combustibles vehiculares preparado por las asociaciones de fabricantes de automóviles de Estados Unidos (Alliance of Automobile Manufacturers – Alliance), de Europa (Association des Constructeurs Europeens d’Automobiles – ACEA) y de Japón (Japan Automobile Manufacturers Association, JAMA) y por la asociación de fabricantes de motores Engines Manufacturers Association (EMA). Este conjunto de Asociaciones representan adecuadamente la posición de la industria automovilística mundial como una propuesta para los productores de combustible [Autoalliance (2006)]. Según tal propuesta, la presencia de etanol hasta un 10% es aceptada como un oxigenante para la gasolina, con recomendación expresa que sea un producto que cumpla con las especificaciones de calidad.

En la actualidad, prácticamente todos los fabricantes de vehículos, independientemente de si se prevé o no el uso de etanol en la gasolina, buscan producir sus modelos en condiciones para usar los nuevos combustibles. En este sentido, los manuales del propietario de los vehículos aclaran las ventajas de la presencia del etanol en la gasolina. Se indica, por ejemplo, que “Toyota permite el uso de gasolina oxigenada con hasta un 10% de etanol. Este combustible posibilita un excelente desempeño, reduce las emisiones y mejora la calidad del aire” [Toyota (2007)]. Pese a que el WWFC limita su recomendación al E10, algunas iniciativas internacionales a favor de mezclas con un 20% de etanol anhidro (E20) están siendo discutidas. En Tailandia y en el estado estadounidense de Minnesota, por ejemplo, se pretende adoptar una mezcla con 20% de etanol. Como respuesta a estas tendencias, ya hay modelos comercializados en Tailandia, como el Ford Escape y el Ford Focus, compatibles con el E20. Ford reconoce que la experiencia acumulada en el mercado brasileño permitió desarrollar rápidamente las versiones para el mercado tailandés.

La introducción más generalizada del etanol como aditivo a la gasolina aún enfrenta serios prejuicios en algunos países donde se podría implementar esta tecnología de modo inmediato, como una alternativa energética renovable y un componente importante del desarrollo local. Sin bases científicas, existe generalizados temores entre los consumidores respecto a la durabilidad y desempeño de sus automóviles, creando una barrera cultural que debe superarse a través de la información clara y objetiva a los interesados. La concepción de que el

El etanol en motores aeronáuticos



Avión agrícola Embraer Ipanema a etanol hidratado.

El uso de etanol hidratado como combustible aeronáutico es una realidad común en el interior de Brasil, que confirma la adecuación y el desempeño de este combustible en motores alternativos. Desde 2005, Embraer, empresa aeronáutica brasileña, produce el Ipanema, un avión agrícola específicamente preparado y regularmente homologado para utilizar etanol hidratado, suministra kits para adaptación de aviones agrícolas a gasolina para etanol y actualmente está desarrollando sistemas flex-fuel para motores aeronáuticos, buscando atender aviones agrícolas y de pequeña envergadura con motor a pistón, cuya flota actual en Brasil es cerca de 12 mil aeronaves [Scientific American Brasil (2006)]. El uso del etanol hidratado permite una importante economía operativa, pues reduce en más del 40% el costo por kilómetro volado e incrementa en un 5% la potencia útil del motor [Neiva Embraer (2008)], motivando el surgimiento de empresas especializadas en convertir y homologar aviones de pequeña envergadura para usar este biocombustible [Aeroálcool (2008)]. En Estados Unidos, desde 1980 se realizan experiencias con etanol en aviones: en 1989, la Federal Aeronautic Authority (FAA) certificó, por primera vez, un motor aeronáutico para etanol (Lycoming IO-540, inyectado) y, en los años siguientes, certificó otro motor (Lycoming O-235, carburado) y dos modelos de aviones, el Cessna 152 y el Piper Pawnee (avión agrícola), para el uso de etanol anhidro con un 5% de gasolina (E95) [BIAS (2006)].

etanol es un buen aditivo y un buen combustible para el consumidor y para la sociedad está demostrada, de forma inequívoca, por los resultados de centenas de estudios sobre la plena adecuación a los motores de combustión interna y, principalmente, por la realidad de millones de vehículos que actualmente funcionan sin problemas con este biocombustible, en una diversificada muestra de países, con flotas heterogéneas y de edades variadas, introduciendo efectivamente el uso de combustibles renovables sin mayores trastornos en variados contextos.

2.2 Aspectos económicos e institucionales del etanol combustible

Tras revisar, en el tópico anterior, los aspectos técnicos que fundamentan la adopción del etanol combustible, es interesante comentar cómo, en condiciones de mercado, se forman los precios de los biocombustibles, en particular, del bioetanol. Los mercados de combustible de la mayoría de los países evolucionaron en las últimas décadas a mercados con precios libres, determinados por los agentes económicos o emulando los mercados más competitivos, según los denominados precios de paridad. En este contexto, los precios del bioetanol para el consumidor serán determinados por el precio al productor, que, a su vez, se deberán definir según las cadenas productivas y logísticas adoptadas, incorporando los tributos debidos y los márgenes de comercialización. Este análisis es esencial para delimitar la efectiva viabilidad del bioetanol y los impactos de la adopción en el mercado consumidor.

Como se presentará en el próximo capítulo, la producción de bioetanol se puede llevar a cabo con diversas materias primas, a las cuales le corresponde un costo de producción y un valor de mercado, que equivale al precio de oportunidad para formar los precios del bioetanol. Así, el precio mínimo del bioetanol para los productores debe considerar dos factores: a) cubrir los costos de producción, que, naturalmente, incluyen los costos de la materia prima y la operación de la planta de producción, así como los costos de capital correspondientes a las inversiones realizadas; y b) ser igual o superior a los resultados que se obtendrían si la materia prima se destinara a la fabricación de productos alternativos. En el caso del bioetanol de caña de azúcar, los productos alternativos a considerar son, básicamente, el azúcar y la melaza, un subproducto inevitable de la industria azucarera, con aplicaciones como insumo industrial y alimento animal.

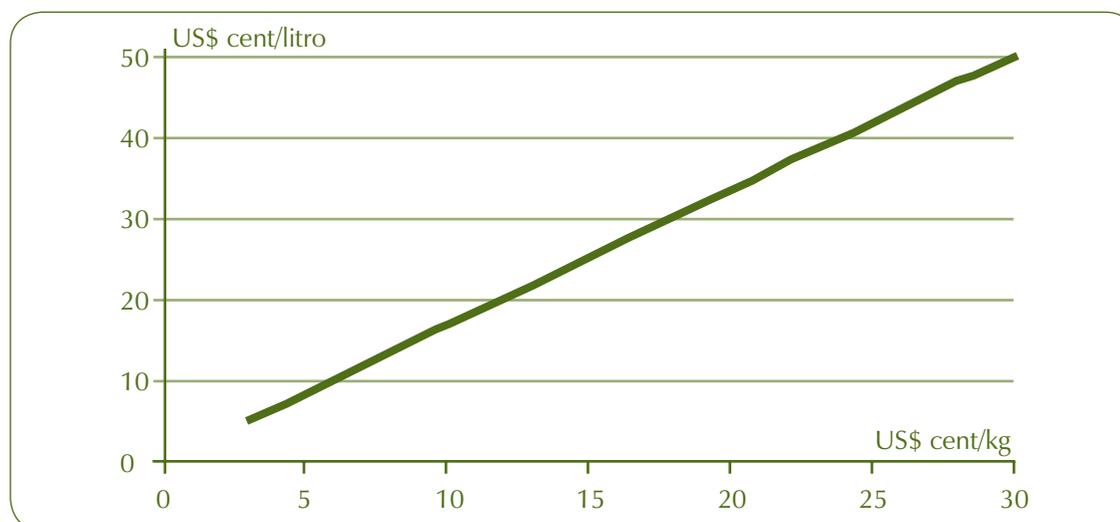
Al tenerse en cuenta las ecuaciones químicas de la transformación de la sacarosa en bioetanol, resulta que 1 kg de azúcar permite, teóricamente, producir 0,684 litros de bioetanol anhidro. Considerando las eficiencias típicas de fermentación y destilación de 90% y 98%, respectivamente, se obtiene la ecuación mostrada a continuación y el Gráfico 5, que permiten estimar el precio de indiferencia del bioetanol anhidro (PIEa) frente a los precios del azúcar (PAç):

$$\text{PIEa (\$/litro)} = 1,67 * \text{PAç (\$/kg)} \quad (2)$$

En esta expresión, se considera sólo el valor de la sacarosa, sin incluir los costos asociados a la inversión y a la operación de la unidad productora. No obstante ello, este precio de indiferencia es un dato importante para el productor por cuanto en principio, sólo tiene sentido

producir bioetanol a precios superiores a dicho precio. Naturalmente, esta relación física pierde sentido en casos límites, por ejemplo, cuando el mercado de azúcar se satura y la posibilidad de reducir la producción de bioetanol para fabricar más azúcar es poco atractiva, ya que los precios del azúcar tienden a bajar por exceso de oferta.

Gráfico 5 – Precio de indiferencia del etanol anhidro en función del precio del azúcar



Fuente: Elaboración de Luiz Augusto Horta Nogueira.

El uso de melaza o miel agotada – subproducto de la producción de azúcar – en la producción de bioetanol también permite un análisis similar, que favorece, en este caso, el bioetanol, pues el precio de la melaza es siempre inferior al precio de azúcar. Sin embargo, las disponibilidades de melaza están siempre determinadas por la producción de azúcar y se pueden considerar limitadas para las necesidades de producción de bioetanol en programas de mayor importancia. En efecto, mientras que, en base al jugo directo, se producen más de 80 litros de bioetanol por tonelada de caña, por medio de la melaza agotada, se producen cerca de 12 litros por tonelada de caña procesada, además del azúcar fabricado. De todos modos, es interesante constatar que, en la mayoría de los países latinoamericanos con producción azucarera, la melaza podría constituir una fuente de bioetanol relevante y precursora para atender las necesidades internas de combustible. Por ejemplo, en los países centroamericanos, sólo con usar la melaza disponible y sin cultivar una hectárea adicional de caña, sería posible atender el 22% de la demanda de bioetanol necesaria para promover la introducción del 10% de este biocombustible en la gasolina consumida, y que es totalmente importada por estos países [Horta Nogueira (2004)].

Naturalmente, a esta evaluación de la viabilidad de la producción de bioetanol, se superponen otras consideraciones, como compromisos y estrategias de mercado. Además, se debe tener en cuenta la variación que los precios del azúcar presentan en los tiempos actuales, como, el resto de otros *commodities*. Otra complicación que no se puede eludir tiene que ver

con la relativa rigidez de los mercados internacionales de azúcar, con un volumen apreciable de producto comercializado mediante cuotas a precios que poco reflejan las presiones de oferta y demanda. Hay una justa expectativa de los países en desarrollo de que estas distorsiones se reduzcan progresivamente, introduciendo más eficiencia y realismo en el mercado azucarero. Un estudio reciente del Banco Mundial, utilizando diferentes escenarios de mercado, presenta simulaciones del comportamiento de los precios del azúcar si fueran liberados los mercados, señalando elevaciones de sólo 2,5% frente a los precios medios actuales. Las ventajas más notables se presentan en los países de Latinoamérica y de África al sur del Sahara [World Bank (2007b)].

Dos referencias importantes para los precios internacionales del azúcar son: a) los contratos preferenciales con Estados Unidos, dentro de las cuotas establecidas por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, con precios determinados por los Contratos nº 14 de la Junta de Comercio de Nueva York (New York Board of Trade – NYBOT), y con Europa, en el marco de los acuerdos ACP (Africa, Caribbean and Pacific) y SPS (Special Protocol Sugar), limitados por cuotas atribuidas a los países productores; y b) contratos libres o de excedentes, que pueden seguir los precios de los Contratos nº 5 de la Bolsa de Londres o los Contratos nº 11 de la NYBOT. Aunque, en ambos casos, estos contratos definan precios de referencia para el comercio internacional, en base a operaciones realizadas electrónicamente en dichas bolsas de productos, los contratos preferenciales corresponden a precios más elevados y mercados menores, mientras que los contratos libres representan mejor la realidad del mercado internacional del azúcar. El Gráfico 6 presenta el comportamiento de los precios del azúcar según el Contrato nº 11 de la NYBOT para los últimos diez años, cuando los precios sufrieron importantes variaciones, con alguna elevación del precio medio.

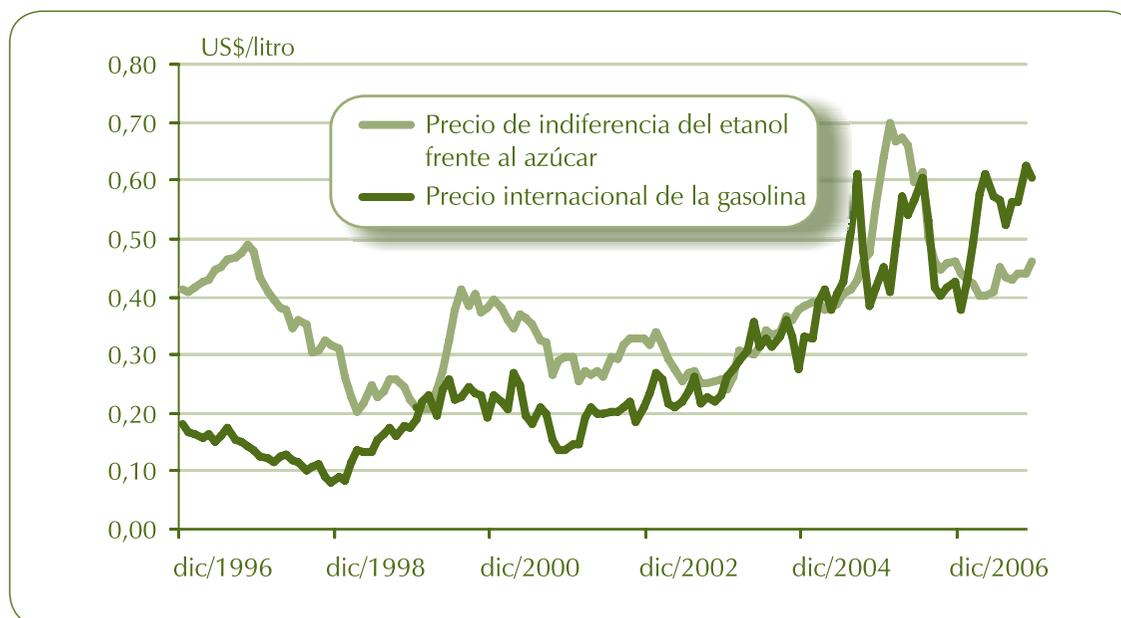
Gráfico 6 – Precio internacional del azúcar (Contrato nº 11 NYBOT)



Fuente: NYBOT (2008).

Tomando los precios del Gráfico 6 y aplicando en la expresión anterior, se pueden estimar los precios mínimos de competitividad para el bioetanol, capaces de estimular los productores a utilizar preferentemente su materia prima para producir el biocombustible. Considerando además que, en mezclas de hasta 10%, un litro de etanol produce el mismo efecto que un litro de gasolina, como se ha comentado anteriormente, se pueden comparar tales precios de indiferencia con los precios de la gasolina (sin tributos, igualmente al por mayor) practicados en el mercado internacional. El Gráfico 7 presenta esta comparación, utilizando para el derivado de petróleo el precio libre de la gasolina regular en la costa del Golfo (U.S Gulf Coast Conventional Gasoline Regular Spot Price FOB).

Gráfico 7 – Precios de indiferencia del etanol frente al azúcar y internacional de la gasolina



Fuente: Calculado en base a NYBOT (2008) y EIA (2008).

La diferencia entre las curvas del Gráfico 7 evidencia bien cómo evolucionó la atracción o competitividad de la producción de bioetanol en base a la caña en los últimos diez años, para usarlo como aditivo en gasolina. Se pueden identificar claramente dos etapas: el período anterior a 2003 y los años posteriores a 2003. En la primera etapa, los precios de la gasolina estuvieron casi siempre por debajo del valor de oportunidad del bioetanol, calculado en base al precio internacional del azúcar. En este período, la producción de bioetanol dependió, en muchas situaciones, de subsidios que cubrieran este diferencial de atracción y que se justificaron por las reconocidas externalidades positivas del bioetanol: menores emisiones atmosféricas, generación de empleos y reducción de la dependencia externa en el abastecimiento energético. En el período siguiente, los precios se aproximaron bastante y, salvo

algunos meses en los que la gasolina estuvo más barata, la fabricación de bioetanol pasó a ser más compensadora que la producción de azúcar a precios internacionales. En este sentido, se espera que los costos de producción sean cubiertos y que el bioetanol pase a ser el producto más interesante, siempre que su precio se determine como fue indicado anteriormente.

Es importante hacer algunas consideraciones con relación al razonamiento anterior. Primero, los precios internacionales de la gasolina no son exactamente aquellos practicados como precio básico en la mayoría de los países, sobre todo en los países importadores, en que los precios internos son definidos incorporando fletes marítimos y los costos adicionales de internación de estos productos, elevando la curva de precios de la gasolina. Por otro lado, al considerarse los precios internacionales del azúcar como referencia o costo de oportunidad para la caña, tampoco se toman en cuenta los descuentos que deben aplicarse en la eventual exportación. El análisis anterior tampoco consideró las materias primas de bajo precio, como la melaza, que posibilitan producir a precios más bajos. De todos modos, esta rápida comparación muestra cómo se amplía el margen de atracción del bioetanol, lo cual alcanza condiciones de disputabilidad efectiva en los mercados de gasolina, en la concepción de Baumol (1982). Además, hay que considerar que la expansión del mercado de azúcar encuentra límites, mientras que el mercado de bioetanol tiene un potencial de expansión prácticamente ilimitado.

Para las condiciones de los productos del estado de São Paulo, el Anexo 3 presenta la serie de precios abonados a los productores de bioetanol (anhidro e hidratado) entre 1975 y 2006, donde se infiere que este biocombustible es vendido, sin impuestos a valores muy cercanos a los precios de la gasolina, y con eso la eventual adopción de mezclas bioetanol/gasolina no provoca variaciones significativas de precios a los consumidores.

Como el límite inferior de la franja de variación de precios al productor de bioetanol es dado por el mayor valor entre los costos de producción y de oportunidad de los productos alternativos de la materia prima utilizada por la agroindustria, en ausencia de mecanismos de intervención el límite superior depende efectivamente de las condiciones de mercado. Así, y de modo comprensible, el productor de bioetanol estará buscando maximizar sus resultados y poner su producto al valor más elevado posible, pero deberá limitar su comportamiento por la presencia de otros productores y, eventualmente, importadores, que limitarán sus márgenes a niveles razonables. Este aspecto resalta la necesidad de que los mercados de bioetanol se promuevan en bases competitivas, incluso mediante la posibilidad de eventual importación, para evitar prácticas monopolistas y promover la reducción de los costos.

En este contexto económico favorable y de interés de los consumidores, es oportuno revisar brevemente el rol del Estado como promotor del desarrollo del mercado de bioetanol. Difícilmente, el bioetanol podrá insertarse en el mercado de combustibles de un país sin un claro soporte gubernamental, que, por medio de la comprensión de la relevancia de los beneficios y de una visión estratégica, coordine esfuerzos y defina objetivos. Considerando como paso inicial e imprescindible la introducción del uso de bioetanol anhidro como aditivo a la gaso-

lina, que dará lugar en el futuro al uso del bioetanol puro, algunos puntos son absolutamente esenciales. Primero, en lo que atañe al mercado de combustibles, caben definir una especificación para el bioetanol y establecer un nivel de mezcla de bioetanol a la gasolina, a ser implementado en forma progresiva y, eventualmente, con parcial alcance geográfico, pero que abarque a mediano plazo todas las regiones y todas las gasolinas. Las experiencias en la actualidad, con innegable éxito, en Colombia y en Costa Rica, por ejemplo, ofrecen excelente referencia de los cronogramas y procedimientos [Horta Nogueira (2007)]. Muchas veces, tales determinaciones - en particular, previendo el uso del bioetanol en la gasolina - requieren modificaciones en el marco legal y regulatorio, aunque deba recordarse que los cambios introducidos periódicamente en la especificaciones de la gasolina, como la prohibición del uso del tetraetilo de plomo, el ingreso del MTBE y las reducciones de la concentración de benceno o azufre, como se llevó a cabo en muchos países, fueron, en varios casos, objeto de normas, decretos y resoluciones de menor complejidad legislativa.

Como segundo punto esencial para la atención de los gobiernos, está la definición de un marco tributario específico para el bioetanol, que, respetando las necesidades de equilibrio fiscal, reconozca que se trata de un producto con ventajas en el uso, comparativamente a la gasolina, como ya se observó. En este sentido, se sugiere una tributación diferenciada y que proporcione el estímulo suficiente para que las incertidumbres y percepciones de riesgo sean superadas, promoviendo la necesaria dinámica con el fin de que los agentes económicos en la cadena de producción y distribución de los combustibles avancen y sean también agentes activos del proceso de motivación de los consumidores para la adopción del bioetanol.

Nuevamente, vale la pena mencionar la experiencia reciente de países en los cuales el uso del bioetanol viene siendo implementado. En todos los casos, se adoptan, con éxito, mecanismos tributarios diferenciados, aplicándose alícuotas que convierten el uso del bioetanol en indiferente o atractivo para el consumidor final. Aunque, como se observa en todo el sector energético, exista una razonable asimetría de información entre los agentes económicos y el gobierno, dificultando definir de manera clara los costos a considerar, el nivel de madurez ya logrado por el mercado de bioetanol en algunos países y en el mercado de combustibles, de un modo general, faculta diseñar marcos tributarios suficientemente robustos en este campo. En este contexto, vale recalcar la relevancia de la articulación de la producción de bioetanol con el desarrollo local, por medio del estímulo a las actividades económicas en todos los sentidos de la producción agroindustrial, de la generación de empleos y del incremento de la renta, etc., además de la economía de divisas, en el caso de un país importador de petróleo, o del aumento en los ingresos de las exportaciones para los exportadores de combustibles.

Naturalmente, tras tomar la decisión de mezclar bioetanol en la gasolina y establecerse las condiciones legales para que esta alteración sea forzosa, los ajustes en el marco tributario no son imprescindibles, ya que el precio de la gasolina pasará a incorporar el bioetanol como nuevo elemento de costo, que sería marginal. No obstante, los impuestos y tasas sobre los combustibles son instrumentos efectivos de política energética y deben usarse incluso para implementación consistente del uso del bioetanol combustible.

Es importante además observar que, en los casos en que el desarrollo del mercado del bioetanol ya alcanzó la comercialización de etanol hidratado y tiene una flota significativa de vehículos flexibles, como sucede en Brasil, los mecanismos reguladores y tributarios son, necesariamente, más complejos y la formación de precios se sujeta a otros condicionantes y modelos. Por ejemplo, en Brasil en los últimos meses y dentro de ciertos límites, es el precio de la gasolina el que define el precio del bioetanol constituyendo el límite a ser respetado por los productores interesados en proteger su mercado consumidor. Este mercado cuenta con un creciente número de vehículos flexibles que podrán migrar a la gasolina, si el precio del bioetanol al consumidor, por litro, supera cerca del 70% del precio de la gasolina en los puestos de venta. Por otro lado, el precio del bioetanol también limita la elevación del precio de la gasolina, ya que los consumidores que eventualmente usan gasolina dejarán de hacerlo si el bioetanol les parece más atractivo. Este arbitraje ejercido por el consumidor tiene en cuenta los costos finales en la utilización de los combustibles, que son, a su vez, una consecuencia de las diferencias de consumo por kilómetro recorrido, y constituye un efectivo estabilizador de los precios de los combustibles en Brasil, incluso en tiempos de altos precios del barril de petróleo.

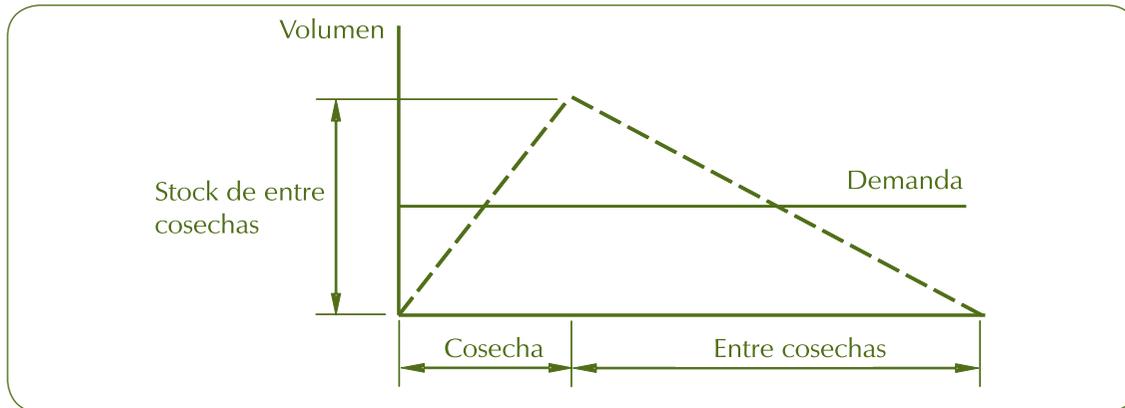
2.3 Cadenas logísticas para el etanol

Una vez presentados los condicionantes de orden técnico y económico y se haya establecido un marco referencial para promover el uso del etanol, es interesante comentar los requerimientos de infraestructura y logística para su efectiva implementación. En muchos países, se reconoce que el etanol debería y podría participar en la matriz energética, pero se señalan obstáculos en la infraestructura y en la carencia de recursos para tal superación.

De un modo general, las condiciones de transporte y almacenaje del etanol, puro o mezclado a la gasolina, no son, esencialmente, diferentes de las empleadas con los combustibles derivados de petróleo. Sin embargo, existen, por lo menos, tres factores particulares e importantes a considerar: la estacionalidad de la producción del etanol, la dispersión espacial de esta producción y la compatibilidad de los materiales de los tanques y tuberías que estarán en contacto con el etanol y sus mezclas. Estos temas se comentarán a continuación, considerando el contexto de la agroindustria de etanol en base a la caña de azúcar.

Como no se puede almacenar la caña de azúcar por muchos días, para la caña cosechada manualmente, y sólo por algunas horas y para la caña picada, recogida con máquinas, sólo durante los meses de cosecha puede haber una efectiva producción de etanol, producto que, a su vez, es consumido regularmente a lo largo de todo el año. En tal contexto, es evidente la importancia de la duración de la cosecha de caña. Son siempre interesantes las cosechas más largas, que permiten utilizar mejor la capacidad de producción instalada y requieren menos capacidad de almacenaje para el período entre cosechas. En este sentido, la producción de bioetanol de maíz o de mandioca (con cáscaras secas) presenta ventajas, ya que la materia prima se puede almacenar.

Figura 5 – Modelo de producción, stock y demanda de etanol



Fuente: Elaboración de Luiz Augusto Horta Nogueira.

En un modelo sencillo de relaciones entre capacidad de producción, depósitos y demanda de bioetanol, como el que se presenta en la Figura 5, se indica cómo sucede la formación y el consumo del stock de entre cosechas. En esta figura, la capacidad de producción adicional al consumo para atender a la demanda de entre cosechas corresponde a la inclinación de curva de producción durante la cosecha, señalando gráficamente el impacto de la duración de la cosecha. En base a este modelo y considerando una demanda anual de un millón de metros cúbicos de bioetanol, al prolongarse las cosechas de 150 días a 200 días, el almacenaje exigido para atender a una demanda constante se reduciría de 589 mil litros a 452 mil litros, es decir una reducción del 23%. De la misma forma, esta extensión del período de cosecha permitiría reducir la capacidad diaria de producción de 6,6 mil litros a 5 mil litros, para atender un mercado idéntico.

Estos valores resultan de ejercicios teóricos. En la realidad, además de las variaciones de la producción y de la demanda a lo largo de los meses, diversos factores de incertidumbre, básicamente climáticos, recomiendan mantener un stock de seguridad, para enfrentar contingencias en el abastecimiento. Así, al comienzo de la cosecha generalmente, existen stocks de bioetanol de la cosecha anterior.

Una manera importante de enfrentar las incertidumbres en el abastecimiento de bioetanol destinado a la mezcla con gasolina es la variación de las concentraciones de bioetanol en función de las disponibilidades de este producto, dentro de una franja en la cual los motores de combustión no presentarán problemas. Este procedimiento es utilizado a menudo por las autoridades brasileñas para la gestión de los stocks de bioetanol, ajustando según las necesidades la concentración de bioetanol entre 20% y 25%.

Por producirse de modo relativamente disperso, con marcada estacionalidad, en unidades ubicadas en la zona rural, de acuerdo a las condiciones climáticas y debiendo mezclarse a la gasolina, el bioetanol requiere de una infraestructura logística más compleja que los derivados de petróleo. El movimiento de cantidades importantes de este combustible – con la

garantía de calidad (especialmente la concentración de agua e impurezas) y sin afectar las instalaciones que sirven también a otros productos– implica una adecuada planificación y el correcto diseño de los sistemas y procesos, para que haya funcionalidad a costos tolerables. Ello no configura un desafío muy diferente a los usualmente enfrentados en general, por la agroindustria, pero en el caso de los biocombustibles debe sumarse las competencias con el área de distribución de combustibles. En el contexto brasileño, los stocks de bioetanol mantenidos por las distribuidoras son suficientes para una o dos semanas de consumo, siendo repuestos regularmente por los productores, sin mayores problemas

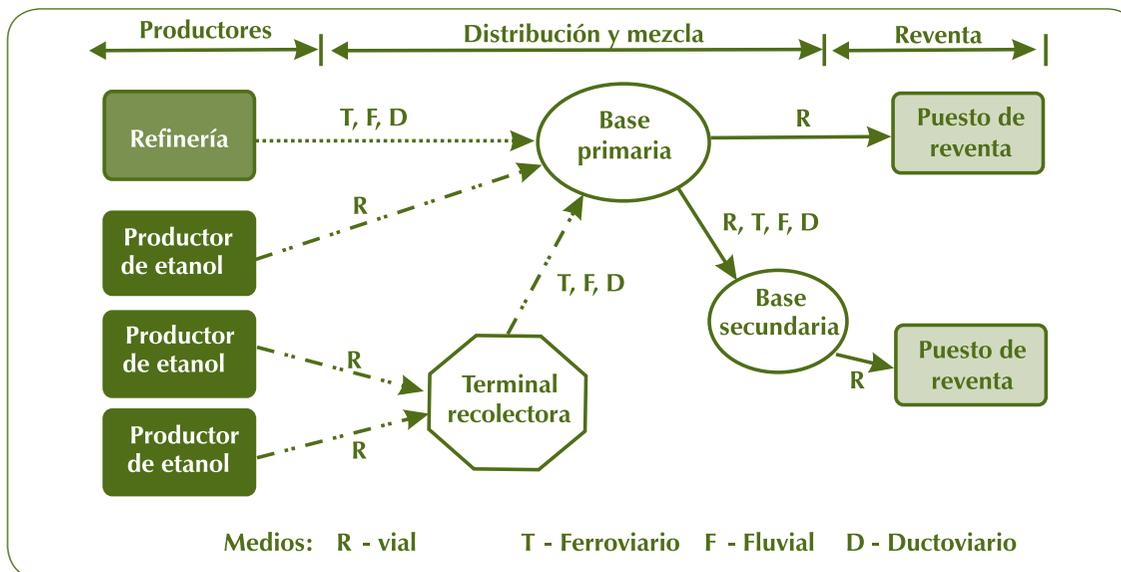
Es interesante entender cómo se articulan el almacenaje y el transporte de bioetanol en Brasil, donde se comercializan casi dos millones de metros cúbicos de producto mensualmente, a partir de más de 350 unidades productoras, con un sistema bastante diversificado de transporte modales y almacenaje intermedio [Cunha (2003)]. En ese sistema, se destacan nueve terminales de recolección de bioetanol en las principales regiones productoras (estados de São Paulo, Goiás, Paraná y Sergipe), con una capacidad total de almacenaje de 90 mil metros cúbicos. El bioetanol de las plantas productoras es recibido por medio vial y despachado a través de medios de transporte más económicos – que pueden ser el ferroviario, el fluvial o el ducto– hacia las terminales o las bases primarias de las distribuidoras de combustible, donde se realiza la mezcla con gasolina. La gasolina con bioetanol es, entonces, distribuida a las bases secundarias o directamente a los 35,5 mil puestos de reventa de las diversas banderas nacionales y multinacionales, empleando nuevamente diferentes medios de transporte, según su conveniencia o disponibilidad, como se sintetiza en la Figura 6.

Aun con tal diversidad de opciones, el 70% del volumen de bioetanol comercializado en Brasil (incluso bioetanol hidratado) es transportado desde el productor hasta las bases primarias y de ahí hacia los puestos de reventa, utilizando solamente camiones-tanque, con capacidad de hasta 30 mil litros. No todo el bioetanol anhidro es comercializado a través de las terminales de recolección, ya que una parte de la producción sigue por rutas más directas hacia los puestos de venta, sobre todo en las regiones más distantes o en mercados de menor tamaño, aunque siempre y necesariamente pase por las bases primarias para la mezcla con gasolina, una obligatoriedad legal de las distribuidoras de combustible.

Esta opción brasileña en permitir la mezcla del etanol anhidro con la gasolina sólo por las distribuidoras fue determinada, esencialmente, por aspectos tributarios (simplificación para coleccionar tributos), ya que, en principio, la mezcla de bioetanol y gasolina podría ser efectuada en las plantas productoras, en las refinerías o aun en las gasolineras, al momento de abastecer los vehículos. No obstante, existen otros justificativos importantes, como la descentralización de la producción de bioetanol y su proximidad a las bases de distribución, así como la necesidad de contar con una clara e inequívoca atribución de responsabilidades en cuanto a un aspecto esencial: la especificación de la calidad del combustible, . En este sentido, el modelo de operación empleado en Brasil es muy claro: las refinerías producen gasolina, las plantas producen bioetanol anhidro y las compañías de distribución de combustibles preparan la mezcla de estas dos cadenas. El último agente económico, las distribuidoras, está encargado de evaluar el producto que recibe (gasolina y bioetanol) y también responde por

la calidad del producto que entrega. Se pueden establecer otros modelos operativos, pero es fundamental que la cadena de responsabilidades sobre la calidad del combustible esté bien definida y sea monitoreada adecuadamente por el gobierno [ANP (2008)].

Figura 6 – Logística de la gasolina y del etanol en Brasil



Fuente: Elaboración de Luiz Augusto Horta Nogueira.

En términos prácticos, la preparación de la mezcla de gasolina y bioetanol en las bases de distribución se efectúa en tanques de gran capacidad - alimentándose continuamente con gasolina y bioetanol, bajo estricto control del proceso de mezcla y calidad - o en el propio camión tanque, cuyos movimientos durante el transporte garantizan la necesaria homogeneidad del combustible tras algunos minutos de tránsito normal. Esta última manera de preparar la mezcla gasolina/etanol es conocida en inglés como *splash blending* y puede ser adoptada a costos bajos. Cabe observar que la medición de la concentración de etanol en la mezcla se efectúa con rapidez y suficiente exactitud por un método bastante simple y directo (absorción del etanol presente en la gasolina mediante su mezcla con agua salada y medición de volúmenes correspondientes en bureta). Este procedimiento rápido, utilizado también en gasolineras, está estandarizado por la norma brasileña ABNT NBR 13.992: Gasolina Automotriz - determinación de la concentración de alcohol etílico anhidro combustible, revisada en 1997.

Para la adaptación completa (tanques, sistemas de mezcla y control) de cuatro bases de distribución para introducir un 7% de bioetanol en la gasolina consumida en Costa Rica, implicando 60 millones de litros de bioetanol por año, se estimó un costo total de US\$ 5 millones, que representan el 3% de los gastos realizados por este país en 2006 para importar combustibles [Ulate (2006)].

Cuando se trata de mover volúmenes importantes, el uso de conductos para el transporte de bioetanol y de la gasolina con bioetanol puede ser el más recomendable, aunque algunos

operadores afirmen que es inadecuado usarlo con etanol. En efecto, por ser potencialmente más corrosivo y actuar como solvente selectivo, además de absorber más agua que los derivados de petróleo, el etanol exige cuidados adicionales, como el control sistemático del estado de los conductos y limpieza cuidada para evitar desechos indeseables. De todos modos, estas dificultades ya son superadas y se utiliza ampliamente este medio con este biocombustible, en Brasil y en Estados Unidos [API (2007)]. En este sentido, es importante mencionar que Petrobras desarrolló una gran experiencia para transporte de este biocombustible en las últimas décadas, transportando anualmente algunos millones de metros cúbicos de bioetanol. Se publicaron más de 200 trabajos técnicos y se emitieron más de 40 procedimientos operativos sobre temas técnicos en la logística del bioetanol en el contexto de la industria del petróleo. También, según esta empresa, en 30 años de operación de conductos con importantes volúmenes de bioetanol, no se observó corrosión bajo tensión (*stress corrosion cracking* – SCC), riesgo señalado como potencialmente asociado a este producto [Gomes (2008)].

Diversos proyectos están actualmente en desarrollo en Brasil para expandir la capacidad de ductos para el bioetanol, previendo incluso conductos de larga distancia dedicados exclusivamente al bioetanol para exportación. Una gran compañía operadora de oleoductos en Estados Unidos, Williams Energy Services, informa que ha despachado regularmente y sin problemas gasolina con bioetanol en sus líneas [Whims (2002)], mientras lanza proyectos para ductos exclusivos para bioetanol en Estados Unidos [Mears (2007)].

Los aspectos logísticos deben ser considerados relevantes para el buen desarrollo de programas de uso de bioetanol combustible. Las cuestiones varían según el caso y se están implantando soluciones específicas con éxito, siempre asociadas a una adecuada planificación. Las dificultades encontradas en contextos tan diferentes como Estados Unidos [Keese (2003)] e India [Balaji (2002)], durante la introducción del uso más extensivo de bioetanol hace algunos años, fueron básicamente asociadas a limitaciones logísticas, por la falta de infraestructura de transporte suficiente y almacenaje del biocombustible. Dichas experiencias recomiendan, expresamente, que se implementen estos programas por etapas, reforzando progresivamente las capacidades, para conquistar, poco a poco, mayor confianza del mercado y de los consumidores.

Dos factores fundamentales para el éxito del uso del bioetanol en Brasil, que distinguen, fundamentalmente, la experiencia brasileña de la registrada en otros países, son la amplia cobertura geográfica y el elevado número de gasolineras que comercializan el producto. Como se ha visto, en la actualidad, los 35.500 puestos de venta de combustible en el país comercializan el bioetanol hidratado y la mezcla de gasolina y bioetanol (excepto el caso particular de la gasolina de aviación, no existe a nivel de mercado minorista la comercialización de gasolina pura en el país). El desarrollo de esta notable infraestructura resultó de un esfuerzo iniciado en las primeras etapas del Proálcool [Programa Nacional del Alcohol] y se fue consolidando a lo largo del tiempo. Es imprescindible reconocer que, sin la determinación política para crear tal infraestructura y sin el apoyo de las empresas de distribución de combustibles y de Petrobras, que durante años se responsabilizó por la adquisición, mezcla y distribución del bioetanol puro en mezcla con gasolina, la experiencia brasileña con el bioetanol no tendría la importancia que alcanzó.



Capítulo 3

Producción de bioetanol

Así como en la producción de bebidas alcohólicas, que normalmente se realiza de diferentes maneras, la producción de biocombustibles a base de materias primas vegetales se puede efectuar por medio de distintas rutas tecnológicas, con ventajas y limitaciones distintas. Entre esos portadores energéticos de energía solar, el bioetanol se destaca, claramente, por ser la alternativa con mayor madurez y por su efectiva inserción en las matrices energéticas de diversos países. En 2006, el bioetanol representó una oferta energética cercana a un 3% de la demanda mundial de gasolina y más de diez veces superior a la producción de biodiesel observada en el mismo período [EIA 2008].

En este capítulo se presenta la producción de bioetanol utilizando las principales materias primas y tecnologías. Se busca ofrecer en cada caso una visión amplia que abarca las etapas agrícola e industrial, con comentarios sobre sus condicionantes, además de los indicadores de productividad actual y potencial. Más adelante se detallarán los sistemas productivos del bioetanol de la caña de azúcar y de maíz, que corresponden a una gran parte de la producción mundial. Además, de un modo más sucinto, se abordarán los sistemas productivos del bioetanol derivado de otras materias primas, como la mandioca, el trigo, la remolacha y el sorgo. Luego de caracterizar esos otros caminos productivos, se presentan algunas recomendaciones sobre los criterios que se deben considerar en la selección de las materias primas que se pueden adoptar para la producción de bioetanol. En esta etapa se pueden destacar el desempeño global en la utilización de recursos naturales (incluyendo la energía) en la conversión de energía solar en biocombustible, además de la emisión asociada a gases de efecto invernadero por unidad energética disponible. Al final del capítulo se presentarán valores para esos parámetros, relacionados con el bioetanol de caña de azúcar y el bioetanol de maíz.

3.1 Materias primas y tecnologías de producción del bioetanol

Entre los combustibles líquidos destacan el etanol y el biodiésel, en las configuraciones observadas en la Tabla 6. Mediante las rutas biológicas, el bioetanol se puede producir a base de cualquier biomasa que contenga cantidades significativas de almidones o azúcares. En la actualidad hay un ligero predominio de la producción relacionada con materiales amiláceos (un 53% del total), como el maíz, el trigo y otros cereales y granos. En esos casos, la tecnología de conversión comienza, generalmente, con la selección, la limpieza y la molienda del grano. La molienda puede ser húmeda, cuando el grano está embebido y fraccionado antes de la conversión del almidón en azúcar (vía húmeda), o seca, cuando eso se realiza durante el proceso de conversión (vía seca). En ambos casos, el almidón se convierte en azúcares mediante un proceso enzimático a altas temperaturas. En ese caso, los azúcares liberados son fermentados con levaduras, y el vino resultante sufre destilación para la purificación del bioetanol. Además del bioetanol, esos procesos implican, generalmente, diversos coproductos, que varían de acuerdo con la biomasa utilizada. En la Tabla 6 se incluyeron únicamente las rutas utilizadas comercialmente; las otras alternativas en desarrollo, como las efectuadas mediante hidrólisis de materiales celulósicos, se comentarán más adelante.

Tabla 6 – Panorama general de los biocombustibles

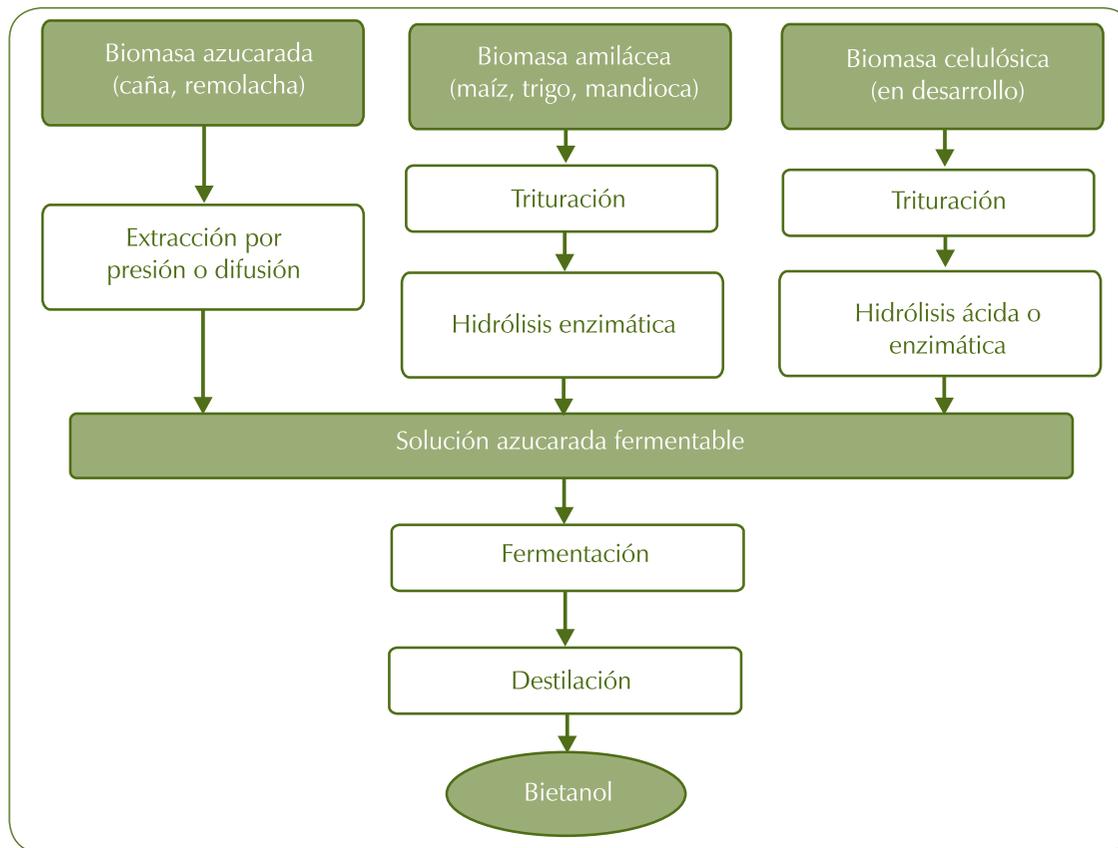
Biocombustible	Materia prima	Disminución en la emisión de gases de efecto invernadero	Costo de la producción	Producción de biocombustible por hectárea	Tierras utilizadas
Bioetanol	Granos (trigo, maíz)	Moderado a bajo	Moderado	Moderado	Tierras fértiles
Bioetanol	Caña de azúcar	Alto	Bajo	Alto	Tierras fértiles
Biodiesel	Aceites de semillas (canola, soya etc.)	Moderado	Moderado	Bajo	Tierras fértiles
Biodiesel	Aceite de palma	Moderado	Moderado a bajo	Moderado	Tierras costeras y húmedas

Fuente: Adaptado de IEA (2005).

Considerando la producción a base de azúcares, como en el caso de la caña y de la remolacha, el proceso es más sencillo e implica una etapa menos, ya que los azúcares están disponibles en la biomasa. En general, el proceso se basa en la extracción de los azúcares (por medio

de la molienda o de la difusión), que pueden seguir directamente hacia la fermentación. Tras la fermentación, se destila el vino, así como en el caso de la producción basada en almidón. La Figura 7 sintetiza las rutas tecnológicas para la producción de bioetanol, considerando las diferentes materias primas de interés. La producción de bioetanol a partir de celulosa está aún en un nivel de laboratorio y plantas piloto, con obstáculos tecnológicos y económicos que se deben superar.

Figura 7 – Rutas tecnológicas para la producción de bioetanol

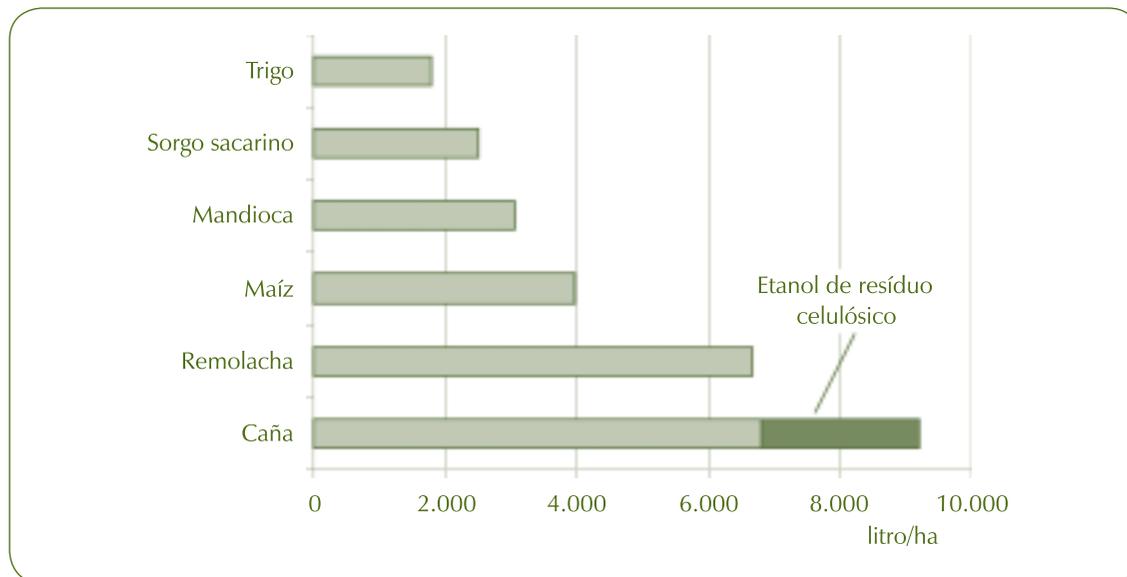


Fuente: Elaboración de Luiz Augusto Horta Nogueira.

En el Gráfico 8 se presenta una comparación entre las diferentes rutas para la producción de bioetanol, que evidencia cómo pueden diferenciarse los índices de productividad por unidad de área cultivada. Los resultados del gráfico corresponden a labranzas en condiciones de buena productividad, que en algunos de los casos pueden implicar un elevado uso de insumos, habiendo sido tomados de la literatura [GPC (2008)] y modificados en el caso de la caña y del sorgo, en función de los análisis presentados más adelante en este trabajo. Las tecnologías industriales implícitas en el gráfico, para la conversión de azúcares y almidón en

bioetanol, se pueden considerar maduras y disponibles, con excepción de las relacionadas a la hidrólisis de materiales lignocelulósicos, ahora en desarrollo, adoptadas también para la obtención de bioetanol de la parte celulósica de la caña. Para la caña, se considera una producción de 80 toneladas de caña por hectárea, una productividad de 85 litros de bioetanol por tonelada de caña procesada, y la utilización del 30% del bagazo disponible, además de la mitad de la paja convertida en bioetanol a razón de 400 litros por tonelada de biomasa celulósica seca.

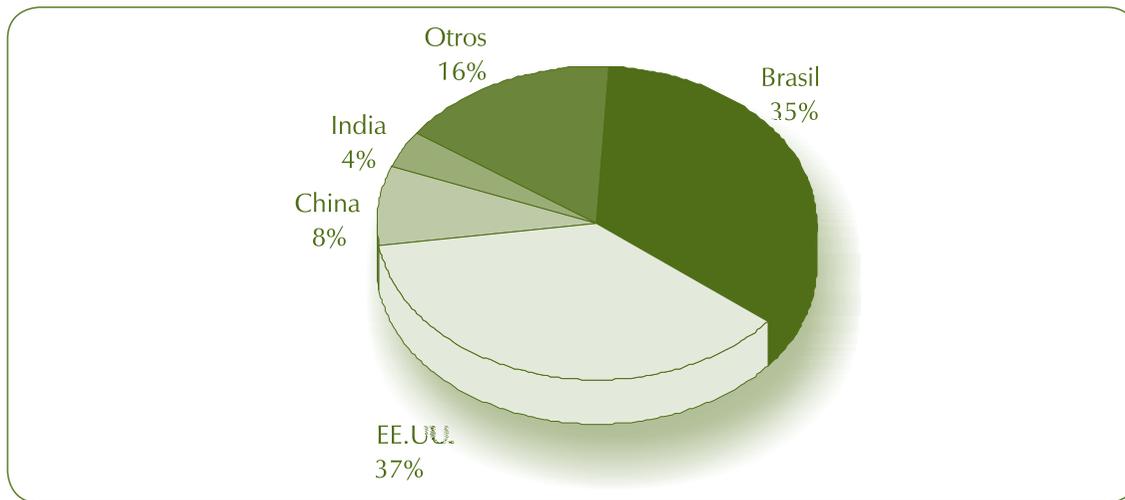
Gráfico 8 – Productividad promedio de etanol por área para diferentes cultivos energéticos



Fuente: Modificado de GPC (2008).

De los 51 mil millones de litros de bioetanol producidos en el año 2006 [F. O. Licht (2006)], la producción estadounidense, a base de maíz, y la brasileña, a base de caña, representaron el 70% del total, como se detalla en el Gráfico 9 [RFA (2008)]. Debido a la importante utilización de ambas materias primas para la producción de bioetanol, a continuación se discuten detalladamente sus respectivas tecnologías de procesamiento, incluyendo también los aspectos agrícolas más relevantes.

Gráfico 9 – Distribución de la producción mundial de etanol en el año 2006



Fuente: Elaborado con base en RFA (2008).

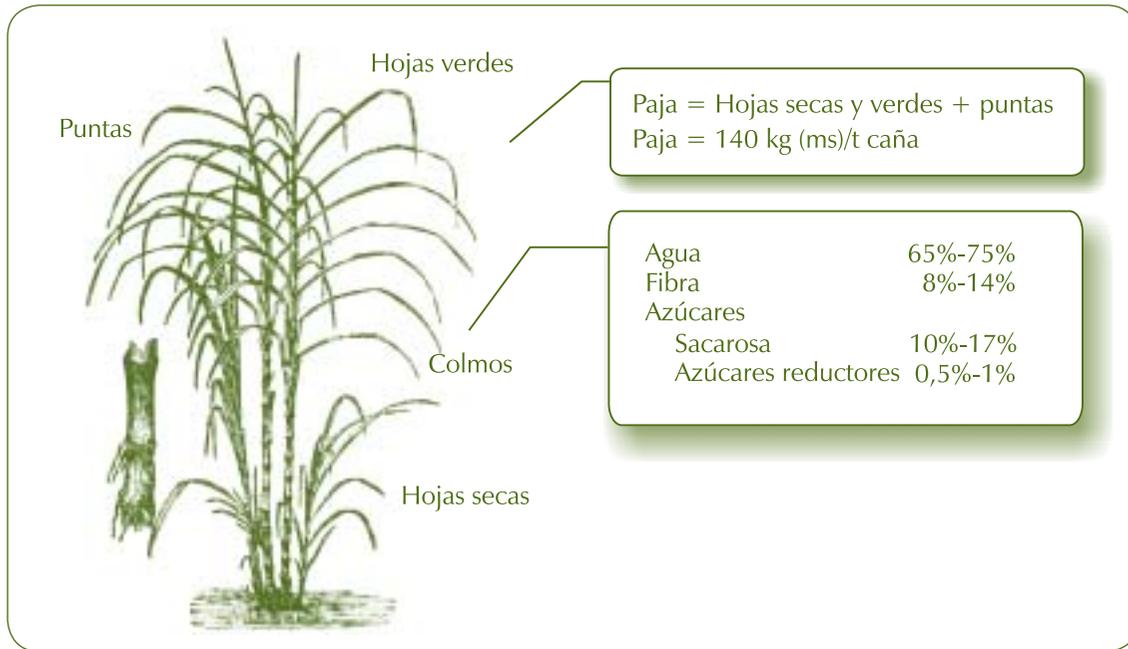
3.2 Bioetanol de caña de azúcar

La caña de azúcar es una planta semiperenne con ciclo fotosintético de tipo C4, perteneciente al género *Saccharum*, de la familia de las gramíneas, compuesta por especies de gramas altas perennes, oriundas de regiones templadas calientes a tropicales de Asia, específicamente de India. La parte aérea de la planta se compone, esencialmente, por los tallos, en los que se concentra la sacarosa, y por las puntas y hojas, que constituyen la paja de la caña de azúcar, como se detalla en la Figura 8. Todos esos componentes juntos totalizan cerca de 35 toneladas de materia seca por hectárea.

La caña es uno de los cultivos comerciales más importantes del mundo, ocupando más de 20 millones de hectáreas. Entre los años 2006 y 2007 se produjeron aproximadamente 1.300 millones de toneladas. Brasil destaca por tener un área sembrada de casi 7 millones de hectáreas, representando el 42% del total de la producción mundial. Es importante destacar que el año azucarero, adoptado en todo el mundo, comienza en septiembre y termina en agosto del año siguiente. El Gráfico 10 muestra los diez principales productores de caña en la cosecha del año 2005 [FAOSTAT (2008a)].

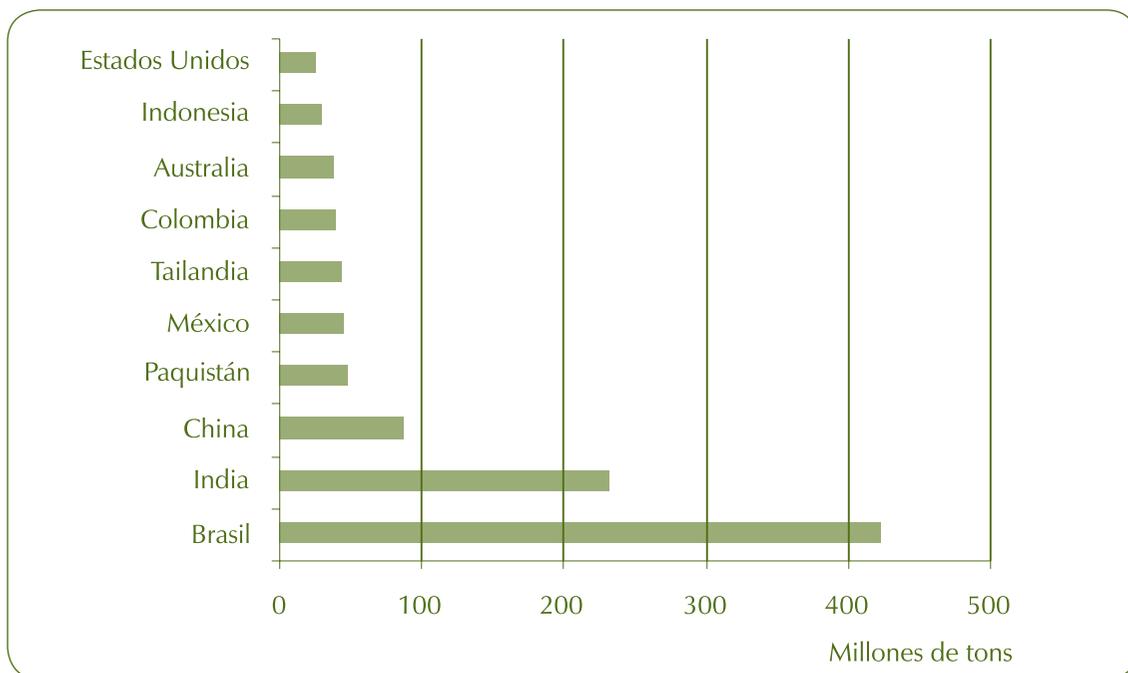
El clima ideal para el cultivo de caña es el que presenta dos estaciones distintas: una caliente y húmeda, para proporcionar la germinación, el macollaje y el desarrollo vegetativo, seguida de otra fría y seca, para lograr la madurez y la consecuente acumulación de sacarosa en los tallos. La caña no presenta una buena productividad en climas como el de las regiones ecuatoriales húmedas, por eso la región amazónica no posee cultivos comerciales extensivos de esa planta.

Figura 8 – Estructura típica de la biomasa de la caña



Fuente: Seabra (2008).

Gráfico 10 – Principales países productores de caña de azúcar en el año 2005



Fuente: FAO (2007).

El ciclo completo de la caña de azúcar varía según el clima local, las variedades y las prácticas culturales. En Brasil el ciclo es generalmente de seis años, en el cual hay cinco cortes, cuatro tratamientos de restos de cultivos y una reforma, como se explica a continuación. De manera general, se hace el primer corte 12 ó 18 meses luego del laboreo (dependiendo de la caña utilizada), cuando se cosecha la llamada caña planta. Los demás cortes, cuando se cosecha la caña soca resultante de la rebrota, se realizan una vez por año, a lo largo de cuatro años consecutivos, con disminución gradual de la productividad, hasta que llega un momento que económicamente conviene más reemplazar el cañaveral que efectuar un nuevo corte. En ese momento se reemplaza la caña antigua por un nuevo laboreo y se inicia así un nuevo ciclo productivo. Durante la renovación del cañaveral el área cultivada permanece en reposo por algunos meses y puede recibir otros cultivos de ciclo corto, como el de las leguminosas.

Según el ciclo productivo de la caña, para estimular una producción más o menos estable en las distintas cosechas y la racionalización del uso de los recursos en la etapa agrícola (maquinaria y mano de obra), las áreas de producción deben estar subdivididas en parcelas en las distintas etapas del ciclo. Corresponde, a un ciclo de seis años, cerca de un sexto del área total de cada etapa. Otra consecuencia importante de ese ciclo productivo es que, en la implantación de una unidad de producción de bioetanol de caña, las actividades agrícolas deben comenzar dos o tres años antes que la efectiva producción industrial, para multiplicar los plántones y alcanzar, luego de empezada la molienda, una producción estable de materia prima durante tres a cuatro años. Para intentar reducir costos y preservar la fertilidad del suelo se han desarrollado técnicas como el cultivo directo y el empleo de Estructuras de Tráfico Controlado (ETCs) para las operaciones agrícolas, lo que permite ampliar el número de cortes, manteniendo la productividad en niveles elevados [CGEE (2007b)].

Es interesante analizar que, como el ciclo productivo típico de la caña presenta cinco cortes, a lo largo de seis años, la productividad promedio por año debe tener en cuenta el período de renovación del cañaveral. Además, como una parte de la caña producida (cerca del 8%) se destina al reemplazo de los cañaverales, la productividad anual, medida en toneladas de caña efectivamente procesadas por hectárea plantada, es inferior a la productividad total evaluada en términos de caña cosechada.

En promedio, la productividad anual, bastante influenciada por la variabilidad climática y por la región productora, se calcula entre 50 t/ha y 100 t/ha (peso del tallo húmedo), siendo que el promedio brasileño se ubica alrededor de 70 t/ha plantada, un valor comparable a las mejores regiones productoras de otros países. Aunque existen registros de productividad de caña de hasta 200 t/ha [Janick (2007)], en la región centro sur de Brasil – donde está ubicada la mayor parte de las plantas brasileñas – esos índices están entre 78 t/ha y 80 t/ha, mientras que en el estado de São Paulo, el principal productor, están en el rango de 80 t/ha a 85 t/ha. En ambos casos, se considera el ciclo de cinco cortes [Unica (2008)]. En el Anexo 2 se muestran valores de la productividad promedio de la caña en Brasil, en toneladas por hectárea cosechada.

En la Tabla 7 se detalla un panorama de los principales parámetros del cultivo de la caña de azúcar practicados en el centro sur brasileño [Macedo (2005) y CTC (2005)]. En esa tabla,

los valores de pol y fibra, suministrados como porcentaje en masa de la caña, corresponden, respectivamente, al contenido de sacarosa aparente y de bagazo disponibles en la caña. Además de la sacarosa, de acuerdo con su maduración, la caña contiene cerca de un 0,5% de otros azúcares (como la glucosa y la fructosa) que no son utilizados para la producción de azúcar sólido, pero que pueden llegar a ser usados para la fabricación de bioetanol [Fernandes (2003)].

Como se puede analizar en la Tabla 7, la demanda de fertilizantes para el cultivo de la caña disminuye cuando se la compara al uso en otras plantaciones, en gran parte debido a los residuos industriales que retornan al campo. La utilización de nitrógeno sintético es baja y en las áreas donde se aplica la vinaza, se suministra todo el potasio por la fertirrigación. Pese a ser una plantación con alta demanda de agua, índices pluviométricos superiores a 800 mm (idealmente, entre 1.200 mm y 1.500 mm) y distribuidos de forma adecuada (períodos lluvioso y seco bien definidos), son suficientes para alcanzar una buena productividad. En unidades productoras típicas, ubicadas en el centro sur brasileño (cuando se utiliza la mitad de la caña para azúcar y la otra mitad para el bioetanol), la aplicación de vinaza representa cerca de 15 mm a 20 mm en el 30% del cañaveral y prácticamente elimina la necesidad de irrigación. Los valores presentados para aplicación de vinaza y “torta de filtro” se refieren a los valores recomendados en condiciones típicas para el estado de São Paulo, según la legislación ambiental.

Figura 9 – Distribución de las 350 plantas de procesamiento de caña de azúcar en Brasil



Fuente: CGEE (2006).

Tabla 7 – Principales parámetros agrícolas de la caña de azúcar

Indicador	Valor
Productividad	87,1 tc/ha
Cosecha de caña cruda (sin quemar)	30,8%
Cosecha mecanizada	49,5%
Pól % caña (contenido de sacarosa)	14,22
Fibra % caña (contenido de bagazo)	12,73
Fertilizantes	
P ₂ O ₅	
Caña planta	120 kg/ha
Caña soca sin vinaza	25 kg/ha
K ₂ O	
Caña planta	120 kg/ha
Caña soca sin vinaza	115 kg/ha
Nitrógeno	
Caña planta	50 kg/ha
Caña soca con vinaza	75 kg/ha
Caña soca sin vinaza	90 kg/ha
Piedra caliza	1,9 t/ha (sólo en el laboreo)
Herbicida	2,20 kg/ha (valor recomendado)
Insecticida	0,12 kg/ha (valor recomendado)
Otros defensivos	0,04 kg/ha
Aplicación de "torta de filtro"	5 t (base seca)/ha
Aplicación de vinaza	140 m ³ /ha

Fuente: Macedo (2005a) y CTC (2005).

El período de cosecha de la caña varía según el régimen de lluvias, de manera de permitir las operaciones de corte y transporte y de poder alcanzar el mejor punto de maduración y acumulación de azúcares. En la región centro sur de Brasil, la cosecha sucede entre abril y diciembre, mientras que en la región nordeste se realiza de agosto a abril. El sistema tradicional de cosecha, aún utilizado en casi el 70% de las áreas cultivadas con caña de azúcar en Brasil, implica la quema previa del cañaveral y el corte manual de la caña entera. Ese modelo, sin embargo, se está reemplazando por la cosecha mecanizada de la caña cruda picada (sin quema), debido a las restricciones ambientales a las prácticas de quema. Se espera que en el año 2020, luego

de los acuerdos firmados entre el gobierno y los productores, toda la caña se coseche de forma mecánica, sin que haya que quemar el cañaveral.

Luego del corte, la caña se transporta lo antes posible hacia la planta, a fin de evitar pérdidas de sacarosa. Con excepción de algunas empresas que utilizan el transporte fluvial, el sistema de transporte se basa en camiones, con diversas posibilidades: camión simple, camión doble (conocido en Brasil como "Romeu-Julietta"), tren de carretera (llamado *treminhão* en Brasil) y roadrailer, cuyas capacidades de carga varían de 15 a 60 toneladas. Vale la pena mencionar que la logística de la caña, relacionada a todo lo que implican las operaciones de corte, cargamento y transporte, está evolucionando continuamente, con la finalidad de reducir los costos y disminuir el nivel de compactación del suelo.



(a)

(b)

Cosecha de caña: (a) manual con quema y (b) mecanizada sin quema.

La caña no se puede almacenar por mucho tiempo una vez cortada y las plantas operan únicamente durante el período de cosecha, independiente de si producen azúcar o etanol. Las etapas iniciales del proceso son similares en ambos casos, como se detalla en la Figura 10. Una vez en la planta, la caña se lava (en general, sólo la caña entera) y se pasa al sistema de preparación y extracción, que en Brasil se basa, esencialmente, en molindas. La extracción del jugo se realiza bajo la presión de cilindros, armados en conjuntos de cuatro a siete sucesivos ternos de molienda. En el conjunto de cilindros de la molienda se separa el jugo,

que contiene la sacarosa, de la fibra (bagazo). Dicha fibra sigue hacia la planta de energía de la planta, donde es utilizada como combustible. En algunas nuevas unidades implantadas en Brasil, ha sido adoptada la extracción por difusión, con expectativas de obtener ventajas desde el punto de vista energético. En los difusores la caña picada y desfibrada pasa por sucesivos lavados con agua caliente y desprende sus azúcares por lixiviación. En la etapa final el producto pasa por un cilindro de secado, de donde sale el bagazo que se utiliza en las calderas. De esta forma, el jugo que contiene los azúcares de caña (producido en la molienda o en el difusor) puede ser utilizado en la producción de azúcar o de bioetanol.



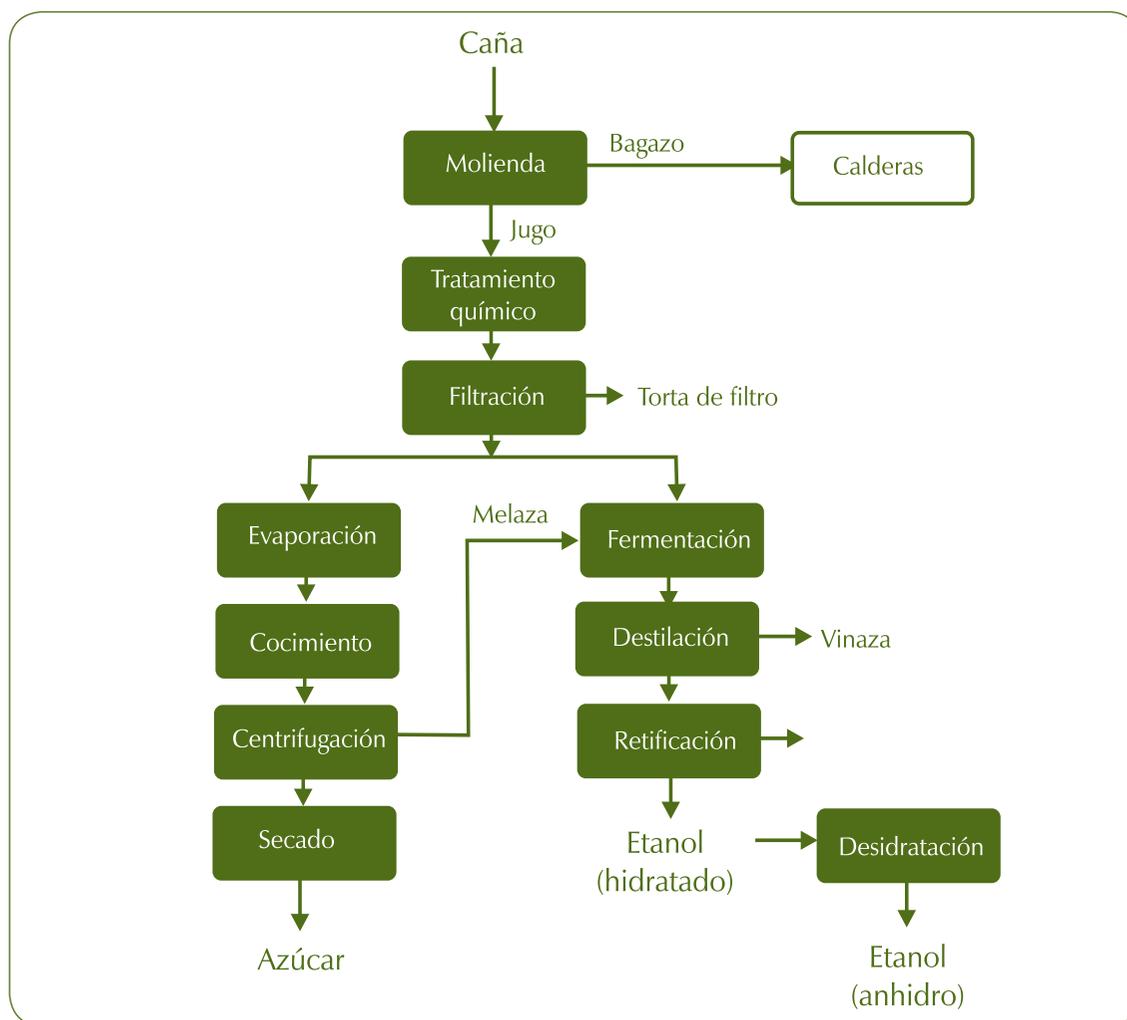
Transporte de caña de azúcar con tren de carretera en Brasil.

Para la producción de azúcar, primero se debe cribar y tratar químicamente el jugo, para lograr la coagulación, la floculación y la precipitación de las impurezas, que son eliminadas por decantación. La “torta de filtro”, que se utiliza como abono, surge de la extracción de azúcar del barro del decantador, a través de filtros rotativos al vacío. El jugo tratado se concentra, consecuentemente, en evaporadores de múltiple efecto y se cristaliza. En ese proceso no toda la sacarosa disponible en la caña se cristaliza y la solución residual rica en azúcar (miel) puede volver al proceso, con el propósito de recuperar azúcar. La miel final, también denominada melaza, que no vuelve al proceso de fabricación de azúcar, aún posee un poco de sacarosa y un elevado contenido de azúcares reductores (como la glucosa y la fructosa, resultantes de la descomposición de la sacarosa) y se puede utilizar como materia prima para la producción del bioetanol, a través de fermentación.

De ese modo, la producción de bioetanol de caña de azúcar se puede basar en la fermentación, directamente del jugo de la caña, o de las mezclas de jugo y melaza, que es como se realiza generalmente en Brasil. En el caso del bioetanol extraído directamente del jugo, las

primeras etapas del proceso de fabricación, desde la llegada de la caña hasta el tratamiento inicial del jugo, se asemejan al proceso de fabricación del azúcar. En un proceso más completo, el jugo pasa por el calaje, calentamiento y decantación, así como en el proceso del azúcar. Una vez tratado, el jugo se evapora para adecuar su concentración de azúcares y, eventualmente, se lo mezcla con la melaza, dando origen al mosto, una solución azucarada y lista para fermentar.

Figura 10 – Diagrama del movimiento de la producción de azúcar y bioetanol de caña



Fuente: Seabra (2008).

El mosto sigue hacia los tanques de fermentación, donde se le agregan levaduras (hongos unicelulares de la especie *Saccharomyces cerevisiae*) y se fermenta durante un período de 8 a 12 horas, dando origen al vino (mosto fermentado, con una concentración del 7% al 10% de alcohol). El Proceso de Fermentación más utilizado en las destilerías del Brasil es el *Melle-*

Boinot, cuya característica principal es la recuperación de las levaduras del vino mediante su centrifugación. De esta manera, luego de la fermentación, las levaduras se recuperan y se guardan para un nuevo uso, y el vino es enviado a las columnas de destilación.

Durante la destilación, primero se recupera el bioetanol en forma hidratada, con aproximadamente 96° GL (porcentaje en volumen), correspondiente a cerca de 6% de agua en peso, dejando la vinaza o “vinhoto” como residuo, en una proporción media de 10 a 13 litros por litro de bioetanol hidratado producido. En ese proceso también se apartan otras fracciones líquidas, dando origen a los alcoholes de segunda y al aceite de fusel. El bioetanol hidratado se puede almacenar como producto final o bien, puede ser mandado a la columna de deshidratación. Pero, como se trata de una mezcla azeotrópica, sus componentes no se pueden separar a través de una simple destilación. La tecnología que más se utiliza en Brasil es la deshidratación por medio de la adición del ciclohexano, cuando se forma una mezcla azeotrópica ternaria, con punto de ebullición inferior al del bioetanol anhidro. En la columna de deshidratación se agrega el ciclohexano en la cumbre, y se retira del fondo el bioetanol anhidro, con aproximadamente 99,7° GL ó 0,4% de agua en peso. La mezcla ternaria extraída de la cumbre se condensa y luego se decanta, y la parte rica en agua se envía a la columna de recuperación de ciclohexano.



Planta de procesamiento de caña de azúcar en Brasil.

También, se puede realizar la deshidratación del bioetanol por medio de absorción con cribas moleculares o mediante destilación extractiva con monoetilenoglicol (MEG), que se destaca debido al menor consumo de energía y a los costos más elevados. Debido a las crecientes exigencias del mercado externo, varios productores de bioetanol de Brasil y de otros países eligen las cribas moleculares, ya que son capaces de producir un bioetanol anhidro que no contamina.

La posibilidad de utilizar los azúcares de caña, total o parcialmente, para la producción de bioetanol se convierte en una característica muy importante para esta agroindustria que, debido a las condiciones de precio, a la demanda existente y a las perspectivas de mercado, puede establecer, respetando ciertos límites, un programa de producción de mínimo costo y máximo beneficio económico. Para aprovechar bien esa ventaja, varias plantas brasileñas poseen líneas de fabricación de azúcar y bioetanol, cada uno con capacidad para procesar el 75% del jugo producido, logrando un margen de un 50% de la capacidad total de proceso ante la capacidad de extracción de las molindas.

Durante este proceso la descarga de agua es bastante alta. Actualmente, en las condiciones del centro sur brasileño, la captación es alrededor de 1,8 m³ por tonelada de caña procesada, pero está disminuyendo de modo significativo, como resultado de la implantación de medidas de reutilización, que permiten la reducción del nivel de captación así como de la disposición de agua tratada. Ese aspecto se analizará con más detalle en el Capítulo 6.

Considerando todo el proceso de producción de bioetanol de caña, los residuos consisten en la vinaza (entre 800 y 1.000 litros por tonelada de caña procesada para bioetanol), en la "torta de filtro" (aproximadamente 40 kg húmedos por tonelada de caña procesada) y en las cenizas de las calderas [Elia Neto (2007)]. Como se mencionó antes, en las plantas brasileñas se valoran esos residuos y luego se convierten en subproductos, que se reciclan y se utilizan como fertilizantes. De esta manera, se reduce de manera significativa la necesidad de incorporar fertilizantes minerales y se evita la necesidad de irrigación en los cañaverales.

Como la producción del bioetanol implica una gran eliminación de agua, la demanda de energía es alta, principalmente de energía térmica, como se detalla en la Tabla 8, elaborada según informaciones de Pizaia (1998). En esa tabla, la demanda de vapor para el bioetanol hidratado y el anhidro consideró, respectivamente, la tecnología convencional con un consumo de 3,0 kg a 3,5 kg de vapor por litro de bioetanol hidratado y un proceso de destilación azeotrópica con ciclohexano, con consumo de 1,5 kg a 2,0 kg de vapor por litro de bioetanol anhidro. Con relación a la demanda de energía eléctrica, hay una pequeña variación entre los procesos, pero todos estos se acercan al valor presentado de 12 kWh por tonelada de caña procesada.

En el caso de la agroindustria de bioetanol basada en la caña de azúcar, la totalidad de energía consumida en el proceso se puede proveer por medio de un sistema combinado de producción de calor y potencia (sistema de cogeneración), instalado en la planta, y utilizando sólo el bagazo como fuente de energía. Efectivamente, en todo el mundo, muchas plantas de azúcar de caña producen gran parte de la energía que necesitan. En Brasil, las plantas se autoabastecen y, muchas veces, exportan a la red pública excedentes de energía cada vez más importantes, gracias al aumento del uso de equipos cada vez más eficientes. Posteriormente, en el capítulo 4, se discutirán más detalles sobre la configuración energética de las plantas y sus potenciales.

Sobre los rendimientos industriales, se puede decir que una tonelada de caña utilizada exclusivamente para la producción de azúcar origina cerca de 100 kg de azúcar, y existe la posibilidad de que se produzcan más de 20 litros de bioetanol con la melaza. En el caso brasileño, considerando los valores promedio observados en cerca de 60 plantas del estado de São Paulo (valores adaptados de CTC, en el año 2005), se obtienen los datos presentados en la Tabla 9, con las pérdidas referidas a una caña mediana con contenido de sacarosa del 14%. Con base en esos valores de rendimiento, en el caso del uso exclusivo para la producción de bioetanol, con una tonelada de caña es posible obtener 86 litros de bioetanol hidratado, mientras que, cuando el objetivo es la producción de azúcar, además de 100 kg de ese producto también se pueden producir 23 litros de bioetanol hidratado, a partir de la melaza. Estos últimos valores se relacionan a un proceso de producción de azúcar con dos masas (procesos sucesivos de cristalización), en el cual la miel no se agota, sino que el resto (que contiene bastante sacarosa) se envía a la producción de bioetanol. Esto permite mejorar la calidad del producto y disminuir el consumo de energía en la producción de azúcar. En síntesis, las sinergias y la complementariedad posible entre la producción de azúcar y bioetanol ayudan a disminuir los costos y a mejorar la eficiencia de los procesos agroindustriales.

Tabla 8 – Demanda de energía en el procesamiento de la caña

Energía	Unidad	Azúcar	Bioetanol hidratado	Bioetanol anhidro
Térmica				
Como vapor saturado a 1,5 bar manométrico, para calentadores, evaporadores y destilería	kg/tc	470-500	370-410	500-580
Mecánica				
Accionamiento de los sistemas de preparación y molienda de caña y motobombas	kWh/tc	16	16	16
Eléctrica				
Motores eléctricos diversos, alumbramiento y otras cargas	kWh/tc	12	12	12

Fuente: Pizaia (1998).

Tabla 9 – Pérdidas y rendimientos promedios de las plantas de caña

Item	Pérdida de azúcar o rendimiento
Lavado de la caña	0,7%
Extracción	3,9%
“Torta de filtro”	0,5%
Indeterminada	3,5%
Destilación	0,2%
Rendimiento fermentativo	90,0%
Rendimiento global	
Azúcar	100 kg/t caña (+ 23 litro/t caña)
Bioetanol hidratado	86 litro/t caña

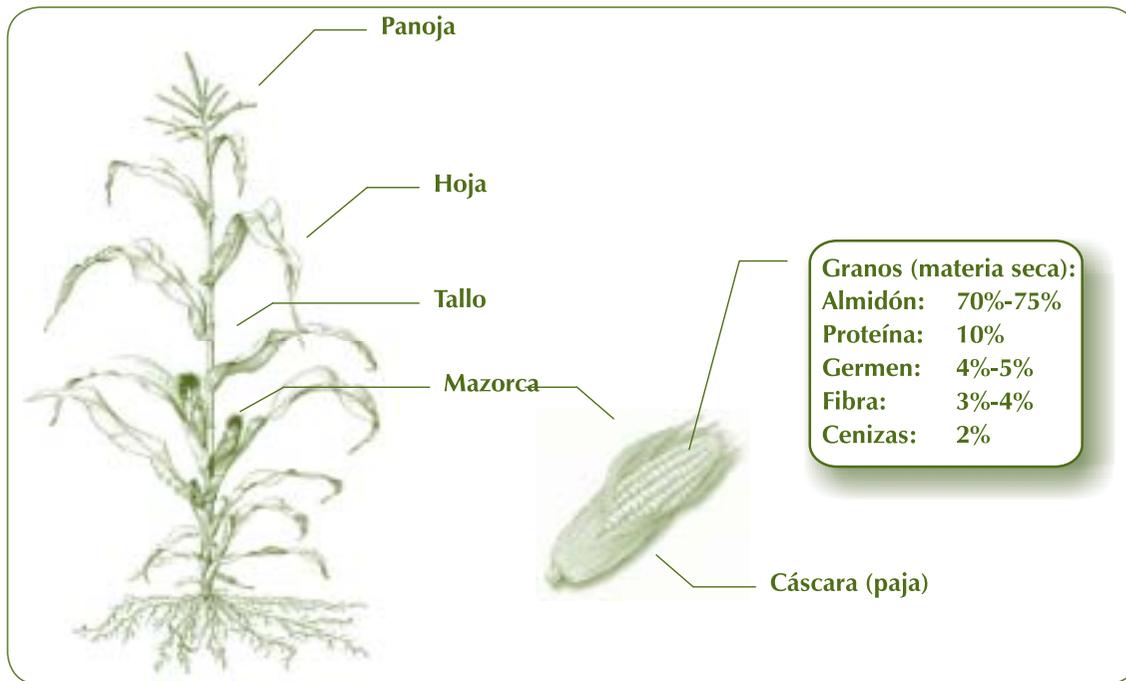
Fuente: Valores adaptados de CTC (2005).

3.3 Bioetanol de maíz

El maíz (*Zea mays spp.*), al igual que la caña, es una planta C4 de la familia de las gramíneas, con ciclo productivo anual. Originario de Mesoamérica, el maíz se cultiva actualmente en todos los continentes. Su producción ocupa 147 millones de hectáreas, en las que se produjeron cerca de 725 millones de toneladas en el año 2004 [Faostat (2008a)]. Este producto es un alimento humano y animal muy importante en varios países.

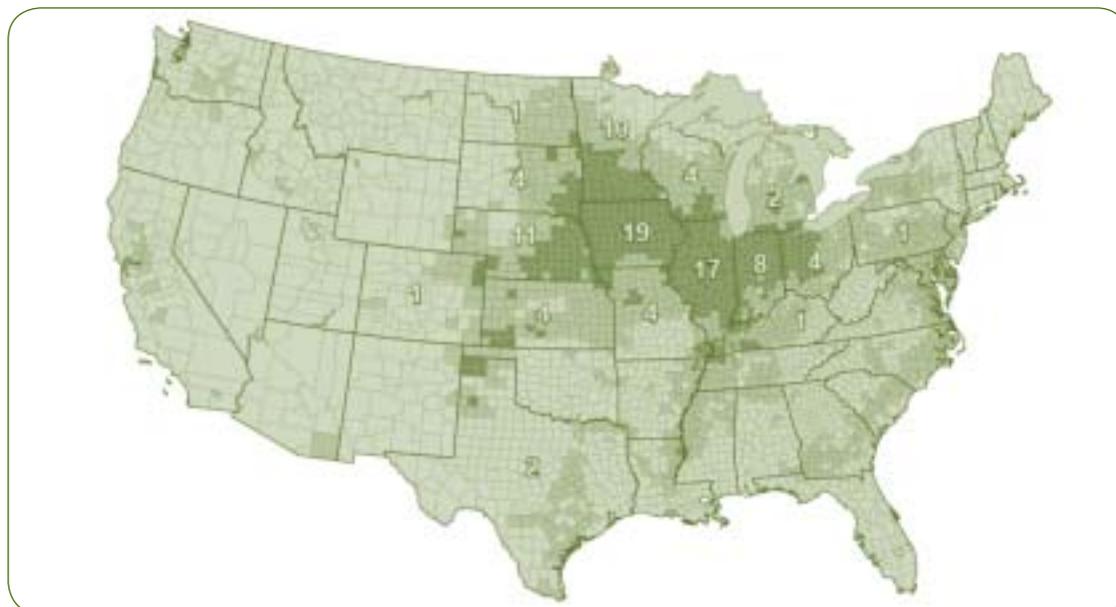
Estados Unidos es el país líder en la producción de maíz a nivel mundial y produce casi la mitad del volumen total. El maíz es la principal materia prima en la producción de bioetanol en ese país: más del 98% se produce a partir de maíz. En el año 2006, la producción estadounidense fue superior a 267 millones de toneladas de granos, en un área cosechada de algo más de 28 millones de hectáreas [USDA (2008)]. Del total producido, más del 50% se destinó a la alimentación animal, y la industria de bioetanol consumió menos del 20% de la producción [Iowa Corn (2008)]. Dentro de los Estados Unidos, la producción se concentra en una región denominada Cinturón del Maíz, donde se destacan los estados de Iowa e Illinois, como se puede observar en la Figura 12.

Figura 11 – Estructura típica de la biomasa del maíz



Fuente: Seabra (2008).

Figura 12 – Distribución de la producción de maíz en los Estados Unidos*



Fuente: Seabra (2008).

* Los números del mapa indican los porcentajes de producción de cada estado.

Por ser una planta que no tolera el frío, en las zonas templadas el maíz se cultiva en primavera, en los meses de abril y mayo (en el caso de los Estados Unidos). Generalmente, el cultivo requiere una rotación de laboreo con alguna planta fijadora de nitrógeno, que puede ser alfalfa o soya (en las regiones con veranos más largos), y también se puede utilizar un tercer cultivo, como el trigo. Según el modelo tradicional, se debe labrar la tierra todos los años. Sin embargo, en la actualidad el uso del laboreo mínimo se convierte, cada vez más, en una práctica común. La cosecha se extiende desde los meses de septiembre hasta noviembre (otoño en los Estados Unidos), y se realiza, generalmente, con una cosechadora mecánica. En la cosecha mecanizada se aparta la mazorca del tallo, luego se extraen los granos de la mazorca, y se dejan la paja y el olote en el campo.

La productividad promedio estadounidense se encuentra alrededor de las 9 toneladas de granos por hectárea [USDA (2008)]. En realidad, los granos representan cerca del 50% de la materia seca de la planta, que aún cuenta con el tallo, las hojas, la paja y el olote [Pordesimo et al. (2004)], totalizando cerca de 15 toneladas de materia seca por hectárea. Aunque se espera que esa biomasa se utilice como alternativa energética, es imprescindible que una buena parte de ella se mantenga en el campo luego de la cosecha, a fin de preservar la fertilidad del suelo [Blanco-Canqui et Lal (2007)].



Cosecha del maíz.

Al comparar el maíz con la caña, concluimos que el primero demanda una cantidad bastante mayor de fertilizantes, según se detalla en la Tabla 10, con resultados ponderados para las áreas con y sin irrigación [Pimentel y Patzek (2005)]. Con relación al agua, la demanda total es de cerca de 5,6 mil m³ por hectárea, aunque el área cultivada que necesita irrigación es menor al 10% [NGCA (2008)].

Tabla 10 – Demanda de fertilizantes y defensivos para la producción de maíz en los EE.UU.

Insumo	Demanda
Nitrógeno	153 kg/ha
Fósforo	65 kg/ha
Potasio	77 kg/ha
Piedra caliza	1.120 kg/ha
Semillas	21 kg/ha
Irrigación (en el 10% del área plantada)	8,1 cm/ha
Herbicida	6,2 kg/ha
Insecticida	2,8 kg/ha

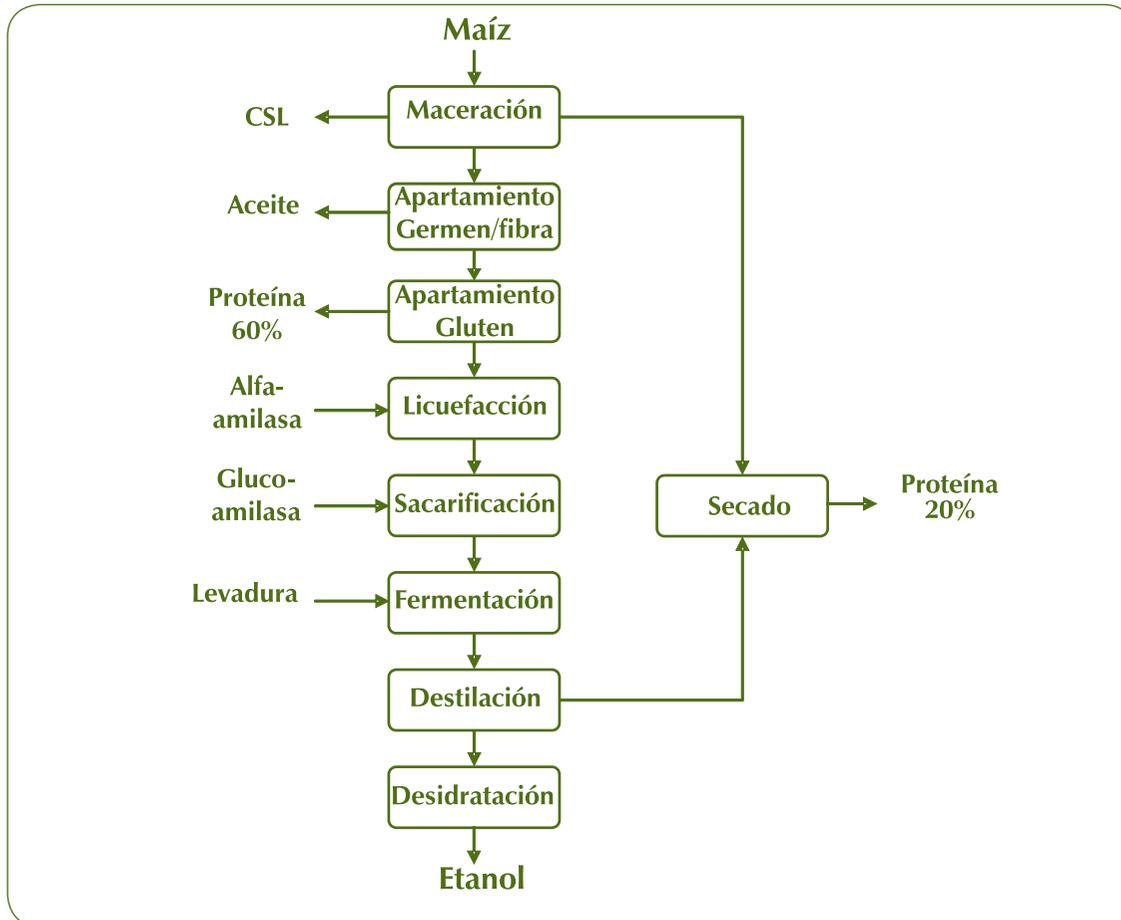
Fuente: Pimentel y Patzek (2005).

El bioetanol de maíz se puede producir por medio de dos procesos, denominados molienda seca y húmeda. La forma húmeda era la opción más común hasta los años 1990, pero en la actualidad la opción seca se ha consolidado como el proceso más utilizado. A pesar de no proporcionar una gran variedad de coproductos, como en el caso húmedo, las innumerables mejoras realizadas en el proceso seco lo han convertido en una opción con costos de inversión y operativos más bajos, hecho que disminuye bastante el costo final del bioetanol [Novozymes (2002)].

En el proceso húmedo, detallado en la Figura 13, se apartan las distintas fracciones del grano del maíz, lo que posibilita la recuperación de diversos coproductos, como proteínas, nutrientes, gas carbónico (CO₂, utilizado en fábricas de bebidas gaseosas), almidón y aceite de maíz. Aunque el aceite de maíz es el producto más valioso, el almidón (y, consecuentemente, el bioetanol) es el producido en mayor volumen, con rendimientos aproximados de 440 litros de bioetanol por tonelada seca de maíz, como se detalla en la Tabla 11.

En el caso de la molienda seca, el único coproducto del bioetanol es un suplemento proteico para alimentación animal conocido como DDGS (*distillers dried grains with solubles*). En ese proceso, esquematizado en la Figura 14, se agregan agua y enzimas (alfa-amilasa) al grano de maíz molido, para promover la hidrólisis del almidón en cadenas menores de azúcar. En la etapa siguiente, esas cadenas son sacarificadas por la acción de la glucoamilasa y la solución resultante es fermentada. En algunas unidades, esas operaciones de liquefacción/sacarificación sufren el reciclaje de una parte de la vinaza fina (proceso de *backsetting*) con la intención de reducir el pH y proveer nutrientes para la fermentación.

Figura 13 – Organigrama del proceso de molienda húmeda para la producción de bioetanol con maíz



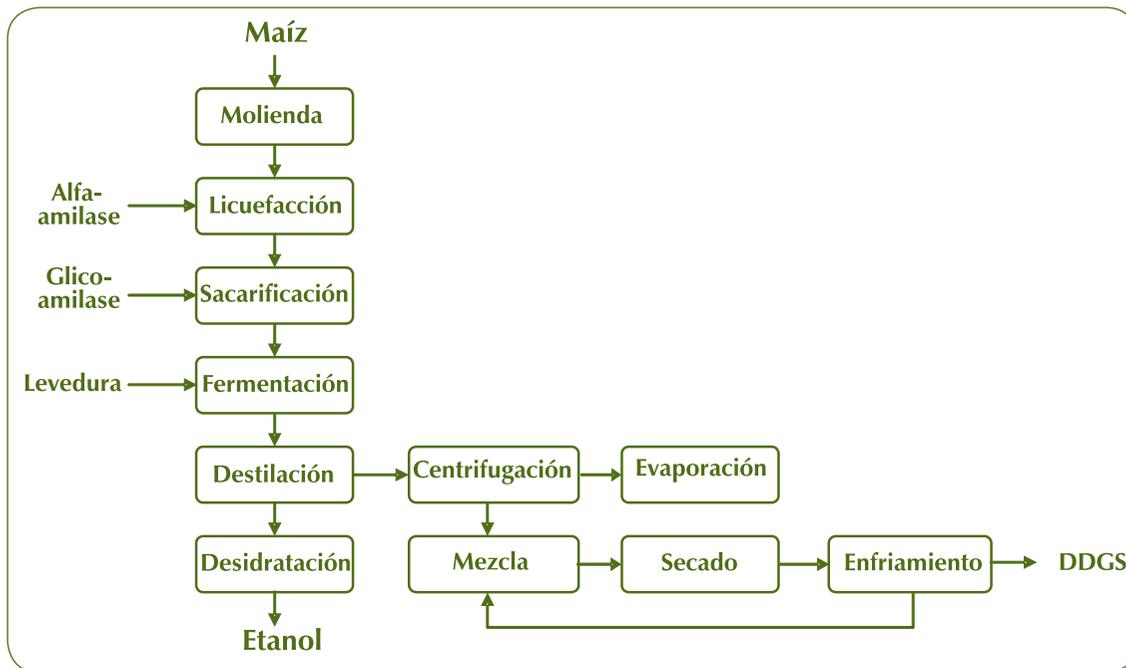
Fuente: Wyman (1996).

Tabla 11 – Rendimientos de los coproductos en la molienda húmeda

Producto	Rendimiento
Aceite de maíz	34–38 kg/t maíz
Proteína 20%	306 kg/t maíz
Proteína 60%	68 kg/t maíz
CO ₂	308 kg/t maíz
Bioetanol	440 litros/t maíz

Fuente: Wyman (1996).

Figura 14 – Organigrama del proceso de molienda seca para la producción de bioetanol con maíz



Fuente: Wyman (1996).

A pesar de desarrollarse rápidamente al principio, el proceso de liberación de azúcares disminuye su velocidad en poco tiempo, lo que puede exigir tiempos de residencia en los reactores, de 48 a 72 horas, para alcanzar la máxima sacarificación del almidón. Con el objeto de disminuir el tiempo de residencia y el riesgo de contaminación, muchas unidades realizan la sacarificación y la fermentación de forma simultánea. En ese caso, también se disminuye la conversión a glucosa. En los procesos que utilizan el backsetting el reciclado de los azúcares no convertidos inicialmente permite su mejor aprovechamiento.

Al igual que en el caso del bioetanol de caña, durante la fermentación, la glucosa se transforma en bioetanol gracias a la acción de la Levadura *Saccharomyces cerevisiae* y el vino producido sigue hacia la destilación. La vinaza producida en esa etapa sigue hacia un conjunto de centrífugas, en las cuales se separa la vinaza fina, que se puede reutilizar en el proceso. En general, la vinaza que sobra se concentra en evaporadores, produciendo un jarabe con cerca de 50% de humedad. Ese jarabe se combina con los sólidos retirados en la centrifuga y se seca hasta el 10% de humedad, y así se origina el DDGS mencionado antes. Las demás etapas de la destilación equivalen al proceso utilizado para el bioetanol de caña en Brasil, con la diferencia de que, en los EE.UU., la deshidratación con criba molecular ya es el proceso más utilizado para la producción del bioetanol anhidro. Con relación a los rendimientos, en general se obtienen, por tonelada seca de maíz, cerca de 460 litros de bioetanol anhidro y 380 kg de DDGS [Wyman (1996)].



Planta de producción de bioetanol de maíz en los EE.UU.

3.4 Bioetanol de otras materias primas

Como se comentó al principio de este capítulo, cualquier materia prima con suficiente contenido de azúcar o almidón puede convertirse en bioetanol. De esa manera, en algunos países se utilizan cultivos como la mandioca, el trigo y la remolacha azucarera, y se mencionan frecuentemente las posibilidades del sorgo sacarino. Esas alternativas se comentarán a continuación.

La mandioca (*Manihot esculenta*) es una planta originaria de Brasil y bastante cultivada en regiones tropicales de África y Asia. Además de su amplia utilización como alimento básico en la dieta humana y animal, en Tailandia y China la mandioca es semi industrializada para exportación (como la tapioca) y utilizada localmente para producir bioetanol para bebidas. Como ventajas principales, presenta un elevado contenido de almidón en sus raíces, entre el 20% y el 30%, es fácil de cultivar, presenta baja exigencia edafoclimática y se puede producir a lo largo de casi todo el año. Esas características motivaron en 1970 algunos intentos

concretos para su uso como materia prima para bioetanol en la primera fase del Proálcool, el programa brasileño de bioetanol. Sin embargo, estos proyectos no tuvieron éxito, principalmente a causa del elevado precio del etanol resultante, comparado con el bajo costo del bioetanol de caña de azúcar y debido a las discontinuidades en el suministro de las raíces para la industria. En los últimos años, principalmente en países asiáticos, la mandioca ha sido propuesta para producción de bioetanol combustible [Howeler (2003)] y se ha empleado en destilerías en Tailandia [Koisumi (2008)].

Para la producción de bioetanol, las raíces de mandioca se deben pelar, lavar y moler, pasándolas luego a cocederos y, sucesivamente, a los tanques para sacarificación del almidón, en procesos similares a los empleados en el bioetanol de maíz. Con índices de productividad industrial semejantes a los analizados para el maíz, una tonelada de mandioca *in natura*, con cerca de 25% de almidón, permite producir 170 litros de bioetanol. En esas condiciones, considerando la productividad agrícola promedio encontrada en plantaciones bien cuidadas en Brasil, se obtienen alrededor de 18 toneladas por hectárea [Mandioca Brasileña (2008)], lo que resultaría en una productividad agroindustrial de 3.060 litros de bioetanol por hectárea. Además de la vinaza, efluente del proceso de destilación, no existen coproductos de valor significativo en ese proceso [Trindade (1985)]. La batata, a pesar de tener un mayor costo que la mandioca, también se podría procesar en bioetanol y ha sido evaluada como materia prima potencial, aunque con resultados limitados.

El trigo (*Triticum spp.*), otro cultivo que posee almidón, también es utilizado en la producción de bioetanol en algunos países europeos, como Inglaterra y Alemania, mediante un proceso industrial bastante similar al utilizado para el maíz. En ese caso, la productividad agrícola y la productividad industrial típicas son, respectivamente, 7,5 toneladas por hectárea y 240 litros de bioetanol por tonelada de granos procesados [LowCVP (2004)], resultando en una producción de 1.800 litros por hectárea cultivada. Similar al maíz, se obtienen cerca de 320 kg de coproductos por tonelada de trigo procesada, los cuales son muy valiosos para la alimentación animal. Semejantes al trigo, las plantaciones de cebada y de centeno han sido utilizadas, en pequeña escala, para la producción de bioetanol combustible en países de Europa.

Entre los cultivos que producen azúcar, además de la caña, la remolacha azucarera (*Beta vulgaris*) ha sido utilizada para la fabricación de bioetanol, utilizando su miel residual (melaza) siempre disponible en la producción industrial de sacarosa [Tereos (2006)]. Esa hortaliza tiene una raíz tuberosa, en la que se acumulan cantidades importantes de azúcar, y presenta una productividad entre 50 y 100 toneladas por hectárea y contenidos de sacarosa del orden del 18% [RIRDC (2007)]. Puede alcanzar índices de productividad agroindustrial bastante elevados, del orden de los 7.500 litros de bioetanol por hectárea cultivada, similares a la caña. El procesamiento industrial de la remolacha comienza con su limpieza y fraccionamiento en trozos finos, que siguen hacia un difusor, en el cual son lavados en agua caliente para liberar su azúcar. El líquido resultante de esa operación contiene, aproximadamente, el 16% de sólidos solubles extraídos de la remolacha, y se lo procesa de forma análoga al jugo de caña, para azúcar o para bioetanol. Con una tonelada de tubérculos se producen, normalmente,

86 litros de bioetanol y 51 kg de una torta fibrosa que se puede utilizar para la alimentación animal [El Sayed et al. (2005)]. Se nota que, aunque la remolacha presenta una alta productividad, depende de energía externa (electricidad y combustibles) para su procesamiento.

Aunque no exista aún una producción significativa de bioetanol a base de sorgo sacarino (*Sorghum bicolor* (L.) Moench), ese cultivo ha sido frecuentemente propuesto como una potencial fuente de materia prima. En particular, la utilización del sorgo para la fabricación de bioetanol se podría eventualmente integrar a la agroindustria de caña. Para esto, se extendería el período usual de cosecha con este cultivo relativamente más rústico que la caña y con diversas semejanzas en cuanto al procesamiento. Los tallos de sorgo dulce se pueden procesar en molindas, produciendo un jugo azucarado, con un contenido de sacarosa inferior al jugo de caña, que puede, a su vez, someterse a un proceso industrial similar para producir miel y bioetanol.

Considerando una productividad industrial de 40 litros de bioetanol por tonelada de sorgo procesado [Icrisat (2004)] y los valores de productividad agrícola de 50 toneladas por hectárea observados en áreas plantadas con el “Cultivar BR 505”¹ se obtiene una productividad agroindustrial de 2.000 litros de bioetanol por hectárea. Sin embargo, el empleo del sorgo aún presenta dificultades que deben ser superadas antes de su efectiva adopción, como su reducida resistencia a la degradación tras la cosecha, la limitada base de germoplasma, la poca adaptabilidad ambiental y la baja resistencia a plagas y enfermedades [Venturi e Venturi (2003)]. Como consecuencia, los experimentos realizados en plantas de São Paulo con sorgo y caña, no produjeron resultados motivadores [Leal (2008)].

Considerando en el mediano plazo el desarrollo de nuevas e innovadoras rutas de conversión de materias primas para la producción de bioetanol, específicamente mediante hidrólisis de materiales celulósicos, crece el interés en las gramíneas de rápido crecimiento y alta productividad, como el pasto elefante (*Pennisetum purpureum*), que es utilizado como forraje en Brasil; el switchgrass – pasto varilla o pasto aguja – (*Panicum virgatum*), especie nativa en América del Norte, que podría producir varios cortes anuales; y el pasto alto del género *Miscanthus*, más usado en Europa como fuente de biomasa celulósica. Además hay interés en las especies silviculturales como el eucalipto y algunas leguminosas arbóreas (en particular, *Leucaena spp.*),

En la selección de un cultivo como fuente de materia prima para la fabricación de bioetanol es indispensable considerar los presupuestos de eficiencia, en un sentido amplio. Habrá que priorizar los cultivos que minimizan los requerimientos de tierra, agua y aportes externos de agroquímicos, entre otros aspectos. Además de eso (e igualmente relevante), se debe tener en cuenta la viabilidad económica, ya que no tiene sentido proponer el uso de cultivos sofisticados y de buen valor de mercado como fuente de bioenergía. La materia prima representa entre el 60% y el 70% del costo final del bioetanol y la búsqueda de alternativas de bajo costo

¹ Variedad desarrollada por la Empresa Brasileña de Investigación Agropecuaria (Embrapa), en el Centro Nacional de Investigación de Maíz y Sorgo, buscando como énfase la producción de bioetanol [Teixeira et al. (1997)].

es fundamental. La existencia de coproductos y subproductos, de valor alimenticio, industrial o energético, es igualmente importante, en la medida en que pueden otorgar una flexibilidad deseable en la producción bioenergética, al asociar la disponibilidad de biocombustibles a otras fuentes de valor económico.

Otro punto relevante para la adecuada selección de biomasas con potencial para la producción de bioetanol, es el balance energético de cada una de ellas, es decir, la relación entre la energía producida y la demanda de energía directa e indirecta para producir esa energía. Son mucho más convenientes los cultivos de alta productividad y baja demanda de insumos energéticos exógenos. Este asunto se tratará detalladamente más adelante.

De ese modo, pese a las perspectivas interesantes de algunos cultivos no convencionales para la producción de bioetanol, es necesario contar previamente con estudios agronómicos más profundos para poder recomendar el uso de estas materias primas de forma extensiva. No obstante la cautela necesaria, conforme avanza el conocimiento acerca de dichos cultivos, la diversificación en la oferta de materia prima para producir bioetanol podrá tener lugar sobre bases consistentes y sustentables, eventualmente en nichos particulares de alto interés, contemplando, por ejemplo, cultivos en suelos salinos y con baja exigencia de agua. De cualquier forma, se debe recordar que la producción de bioetanol no se puede considerar sustituta de la producción agrícola actual, aunque sí puede ser una nueva actividad destinada a utilizar tierras marginales en un proceso de expansión y diversificación de las prácticas agrícolas.

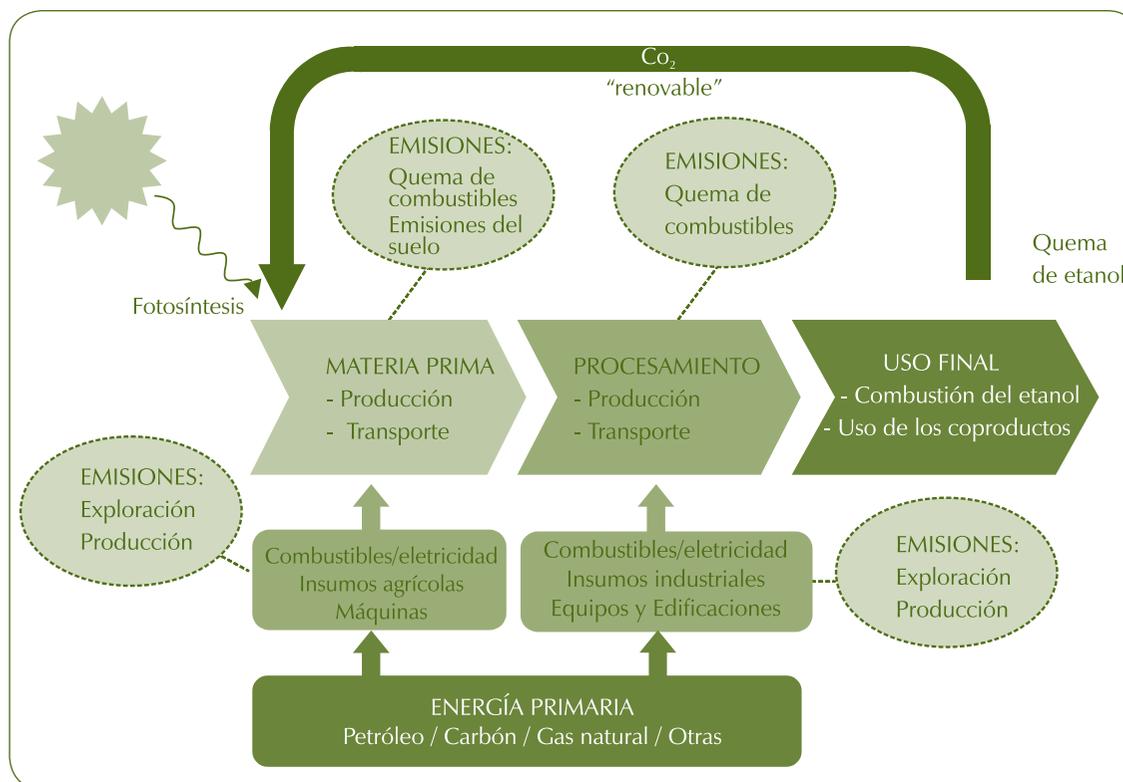
3.5 Productividad, emisiones y balances energéticos

Independientemente de la biomasa utilizada para su producción, el principal objetivo del uso del bioetanol como combustible es la sustitución de derivados de petróleo, lo que permite disminuir la dependencia de esos recursos fósiles y mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEE). Sin embargo, la proporción en la que un biocombustible puede reemplazar a un combustible fósil depende, especialmente, de su modo de producción. Como todas las tecnologías de producción implican (directa o indirectamente) el uso de recursos fósiles, el beneficio asociado al uso de un biocombustible depende de la economía efectiva de energía no renovable que él proporciona, cuando se lo compara con su equivalente fósil. Para el adecuado cómputo de las energías implicadas en el proceso de producción agroindustrial, se deben considerar las emisiones de GEE asociadas a su ciclo de vida, resultantes no sólo de la quema de los combustibles fósiles (por ejemplo, por los tractores en las operaciones agrícolas) sino también de aquellas provenientes de otros efectos (por ejemplo, en la producción y uso de fertilizantes), como se detalla en la Figura 15.

Como se puede ver en la Figura 15, las fronteras del sistema que se analiza pueden cambiar, dependiendo del estudio conducido, pero en general, los análisis de ciclo de vida intentan

determinar los gastos de energía y las emisiones de GEE, desde la producción de materia prima hasta el uso final del combustible. Se consideran los consumos de energía y emisiones asociados a la producción de los insumos y equipos utilizados en la cadena productiva del biocombustible. Es importante notar que, en principio, todo el CO₂ liberado en la quema de productos de la biomasa se recicla por medio de la fotosíntesis, durante el crecimiento de la biomasa en el ciclo productivo siguiente, pero la parte correspondiente a los combustibles fósiles consumidos en la producción del bioetanol genera un incremento neto de la cantidad de esos gases en la atmósfera.

Figura 15 – Diagrama del ciclo de vida de un biocombustible



Fuente: Seabra (2008).

Recientemente se han planteado algunos cuestionamientos sobre el impacto del cambio de uso de la tierra para la producción de materias primas para biocombustibles, especialmente en términos de emisiones de GEE. Se cree que, dependiendo de la vegetación que existía antes en el área utilizada para la producción de biocombustibles, la perturbación provocada por el cambio de uso del suelo podría desprender una cantidad de carbono, antes “capturado” en la vegetación y en el suelo, cantidad lo bastante alta como para comprometer el beneficio ambiental. Esto, sin embargo, sigue siendo discutido, debido principalmente a la poca disponibilidad de datos sobre ese efecto.

De todas maneras es un tema que merece ser discutido concienzudamente; además, son necesarias aún más investigaciones para determinar con precisión la cantidad de esas emisiones durante el ciclo de vida de los biocombustibles. Sin embargo, por lo menos en el caso brasileño, es poco probable que se puedan asociar pérdidas de cobertura forestal a la producción de bioetanol, pues la expansión del cultivo de la caña ha ocurrido principalmente en áreas antes ocupadas por pastos de baja productividad o plantaciones anuales como la soya, destinadas en gran parte a la exportación. Asimismo, la soya retiene menos carbono que la caña de azúcar. Otro aspecto que hay que tener en cuenta es el efecto del incremento de la cosecha de caña cruda que tiene mayor cantidad de paja, lo que permite incorporar mayor cantidad de carbono al suelo.

Se han realizado varios estudios con el objetivo de evaluar los impactos energéticos y ambientales de los biocombustibles. En el caso de la caña, considerando la sustitución de la gasolina y la mitigación de las emisiones de GEE, desde hace tiempo se reconocen las ventajas ambientales del bioetanol en Brasil, especialmente desde la divulgación de los primeros trabajos detallados sobre este tema [Macedo y Horta Nogueira (1985) y Macedo (1992)]. Desde entonces, han sido publicados estudios de actualización [Macedo (1998) y Macedo et al. (2004)], siguiendo la evolución de las prácticas agroindustriales en el sector sucroalcoholero y el avance del conocimiento sobre los aspectos ambientales.

En la última evaluación publicada se analizaron los balances de energía y emisiones de GEE en la actualidad y se realizó una proyección sobre lo que sucederá en el año 2020, considerando un enfoque “desde el cultivo de la caña hasta el portón de la planta” [Macedo et al. (2008)]. En relación a los promedios de los principales parámetros agrícolas e industriales de las 44 plantas en la región centro sur de Brasil, este estudio indica que, actualmente, por cada unidad de energía fósil utilizada en la producción del bioetanol de caña se producen más de nueve unidades de energía renovable, en la forma de bioetanol y excedentes de energía eléctrica y bagazo, como se presenta en la Tabla 12. Es interesante notar que, considerando la mayor mecanización y la utilización de tecnologías agrícolas que deben ampliar la oferta energética en un 12% en el período de 15 años, el incremento de la producción de bioetanol por tonelada de caña procesada y, principalmente, la significativa ampliación de la producción de energía eléctrica, deberán permitir que la agroindustria de caña de azúcar se mantenga como la más eficiente forma de producir biocombustibles y, en proporciones crecientes, bioelectricidad, con expectativas de que la relación de energía (producción/consumo energético) alcance niveles superiores a 11. Esos cálculos prevén excedentes de energía eléctrica de 9,2 kWh y 135 kWh por tonelada de caña y tasas térmicas en los sistemas de cogeneración de 9 MJ/kWh y 7,2 MJ/kWh, respectivamente, para los años 2005/2006 y 2020. Estos valores son compatibles con las tecnologías disponibles y en desarrollo, que consideran, en ese último caso, la utilización de la paja de caña de azúcar (el 40% de recuperación) como combustible suplementario al bagazo, en sistemas con turbinas de extracción, condensación de alta presión y procesos de consumo reducido de vapor (340 kg de vapor por tonelada de caña procesada) [Macedo et al. (2008)].

Tabla 12 – Balance de energía en la producción de bioetanol de caña (MJ/tc)

Componente del balance energético	2005/2006	Escenario 2020
Producción y transporte de caña	210,2	238,0
Producción de bioetanol	23,6	24,0
<i>Input</i> fósil (total)	233,8	262,0
Bioetanol	1.926,0	2.060,0
Excedente de bagazo	176,0	0,0
Excedente de electricidad	82,8	972,0
<i>Output</i> renovable (total)	2.185,0	3.032,0
Producción/consumo energético		
Bioetanol + bagazo	9,0	7,9
Bioetanol + bagazo + electricidad	9,3	11,6

Fuente: Macedo et al. (2008).

En relación a las emisiones de gases de efecto invernadero, actualmente la producción del bioetanol anhidro de caña de azúcar implica una emisión de casi 440 kg CO₂eq/m³ de bioetanol, con perspectivas de alguna reducción en los próximos años, como se detalla en la Tabla 13. Sin embargo, en las condiciones actuales la emisión líquida evitada resultante (diferencia entre las emisiones en producción y las emisiones evitadas) alcanza 1.900 kg CO₂eq/m³ de bioetanol, cuando se considera su utilización en mezclas con gasolina de un 25%, como la adoptada en Brasil, y se asocian los efectos por el uso del bagazo y de la electricidad excedentes. Bajo las condiciones esperadas en 2020 la reducción podría llegar a niveles superiores a 2.260 kg CO₂eq/m³ de bioetanol, como se presenta en la Tabla 14. Esto ocurre porque, cuando se reemplaza la gasolina por el bioetanol, toda la emisión asociada al uso del combustible fósil es mitigada, pasando a contabilizarse sólo las emisiones relacionadas con la producción del bioetanol, que, a su vez, dependen de la eficiencia del uso final de ese biocombustible. En esas evaluaciones se constató que el bagazo excedente debe sustituir al aceite combustible en calderas y que la energía eléctrica producida en la agroindustria del bioetanol pasa a ocupar el lugar de la energía eléctrica, generada con los factores de emisión promedio mundiales (579 y 560 t CO₂eq/GWh para 2005 y 2020, respectivamente) [Macedo et al. (2008)].

Tabla 13 – Emisiones en la producción del bioetanol de caña (kg CO₂eq/m³)

	2005/2006		Escenario 2020	
	Hidratado	Anhidro	Hidratado	Anhidro
Bioetanol				
Emisión total	417	436	330	345
Combustibles fósiles	201	210	210	219
Quemas	80	84	0	0
Suelo	136	143	120	126

Fuente: Macedo et al. (2008).

Tabla 14 – Emisiones líquidas de la producción y uso del bioetanol de caña (kg CO₂eq/m³)

Forma de utilización del bioetanol	2005/2006		Esenario 2020		
	E100	E25	E100	E100-FFV*	E25
Emisiones evitadas	2.181	2.323	2.763	2.589	2.930
Uso de la biomasa excedente	143	150	0	0	0
Excedente de electricidad	59	62	784	784	819
Uso del bioetanol	1.979	2.111	1.979	1.805	2.111
Emisiones netas	-1.764	-1.886	-2.433	-2.259	-2.585

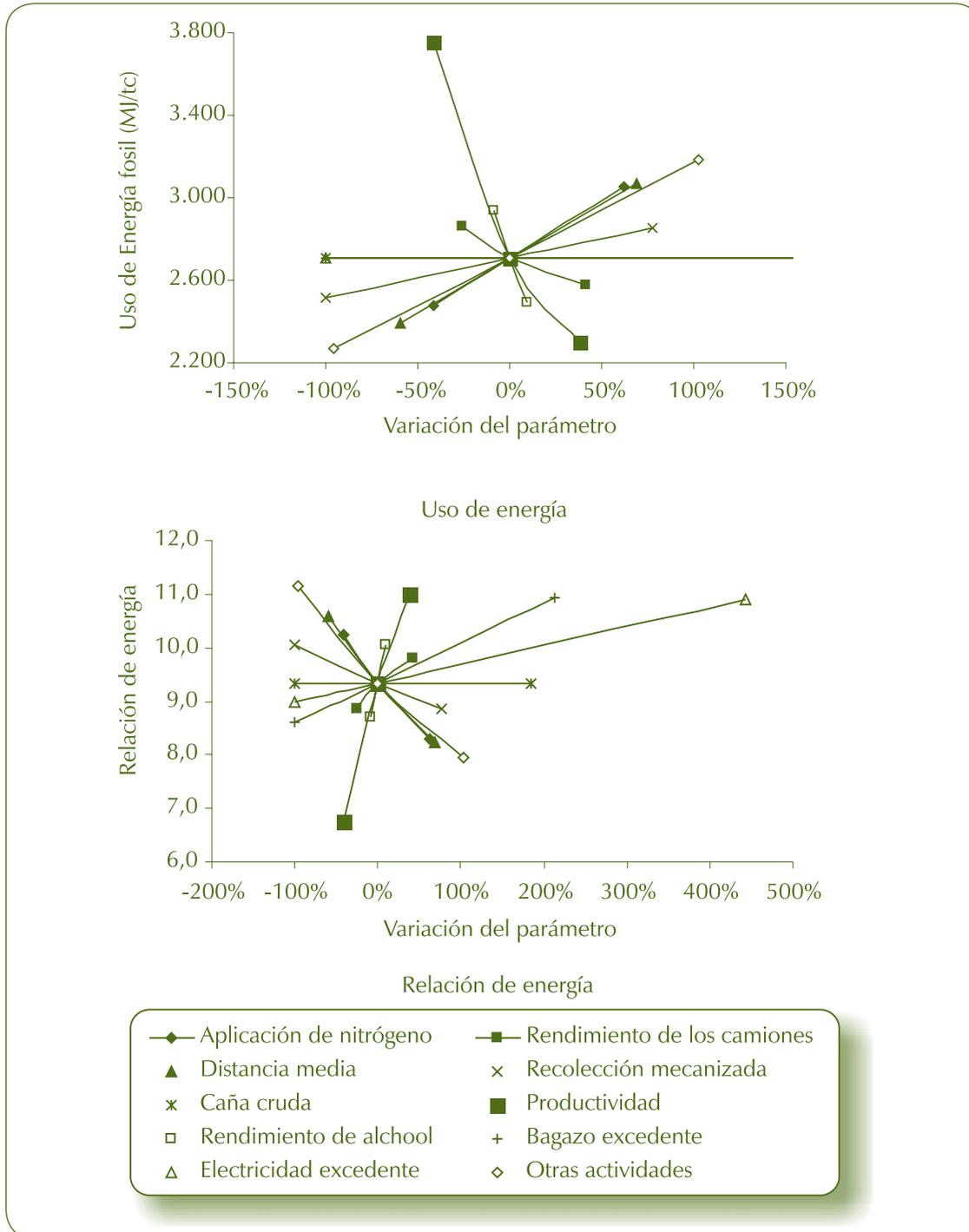
Fuente: Macedo et al. (2008).

* FFV: vehículos flexibles.

Vale la pena recordar que esos resultados se basan en las condiciones promedio de los análisis de plantas del centro sur brasileño, en los cuales puede haber variaciones en los balances energéticos, dependiendo de los parámetros agrícolas e industriales individuales que se consideren en el caso de cada planta. La Figura 16 muestra la influencia individual de la variación de dichos parámetros sobre el uso de energía en las plantas y sobre la relación de energía (producción/consumo de energía), mientras que la Figura 17 representa la sensibilidad de las emisiones de GEE y de las emisiones líquidas de GEE, considerando los intervalos de variación verificados en esas plantas. En ese sentido, esos resultados se pueden considerar como característicos de la agroindustria energética basada en la caña de azúcar, con buenos indicadores de desempeño, tal como es practicada en varios países tropicales con clima favorable para su cultivo.

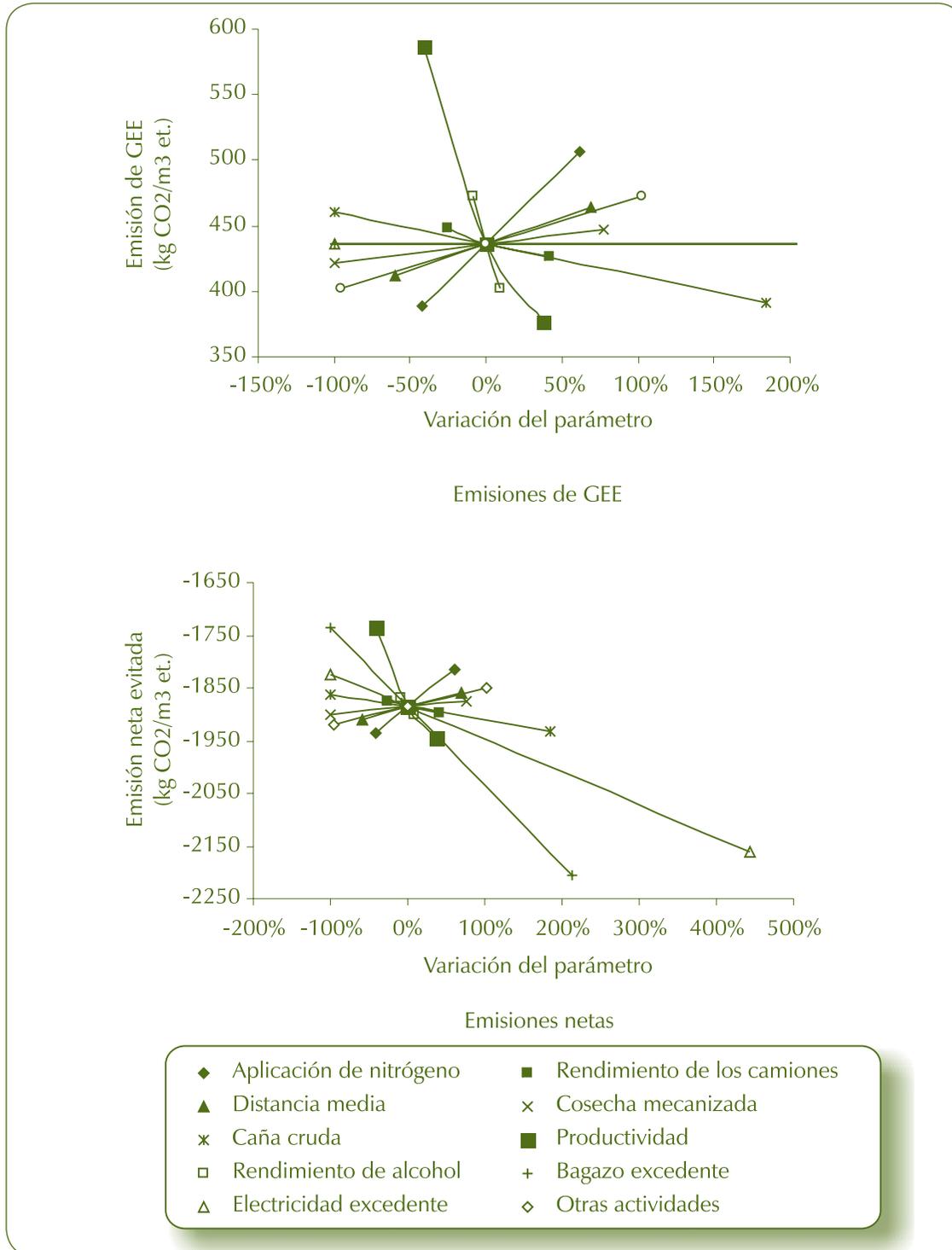
Actualmente, la producción de bioetanol basada en los azúcares de caña ya es una tecnología madura, y no hay mucho espacio para grandes incrementos de rendimiento, en particular en la fase industrial. Sin embargo, para la producción de bioetanol a base de material lignocelulósico de la caña, como el bagazo y la paja, las perspectivas son mejores. Actualmente, la tendencia más clara es que las plantas se conviertan en unidades productoras no sólo de azúcar y bioetanol, sino también de volúmenes significativos de electricidad, forma de energía que presenta calidad y valor económico superiores a los de los combustibles fósiles por unidad de energía producida. Las opciones de cogeneración más avanzadas, combinadas con configuraciones de proceso con menor demanda de energía, permiten que eso sea posible. Para un futuro próximo, una parte significativa de la paja se le agregará al bagazo como combustible suplementario, permitiendo la generación de energía eléctrica a niveles aún más elevados y generando mayores excedentes de electricidad, superiores a 100 kWh por tonelada de caña procesada. Considerando esto, es razonable esperar que en el año 2020 la relación de energía (producción de energía renovable/consumo de energía fósil) para el bioetanol de caña sea próxima a 12, con emisiones netas evitadas de, aproximadamente, 2.600 kg CO₂eq/m³ de bioetanol [Macedo et al. (2008)].

Figura 16 – Análisis de sensibilidad del uso de la energía y de relación consumo/ producción de energía en la producción de caña de azúcar en el escenario actual (2005/2006)



Fuente: Macedo et al. (2008).

Figura 17 – Análisis de sensibilidad de las emisiones de GEE en la producción de bioetanol de caña de azúcar en el escenario actual (2005/2006)



Fuente: Macedo et al. (2008).

A diferencia del caso del bioetanol de caña, existe aún bastante controversia sobre los beneficios ambientales en el uso de bioetanol de maíz para la sustitución de la gasolina. De cualquier manera, no hay dudas de que, en el mejor de los casos, el beneficio es bastante inferior al logrado por el bioetanol de caña. Eso se debe a que, aunque el procesamiento del maíz demanda una cantidad de energía significativamente menor que la caña para convertirse en bioetanol, en el caso del maíz toda la energía proviene de fuentes fósiles externas. El vapor necesario (10,6 MJ/litro) se produce en calderas a gas natural y la electricidad (0,4 kWh/litro) es suministrada por la red pública, que en los EE.UU. depende de los recursos fósiles [Pimentel y Patzek (2005)].

En un trabajo comparativo realizado recientemente [EBAMM (2005)], se analizaron varios estudios, y se llegó a la conclusión de que la relación de energía más representativa para el bioetanol de maíz en las condiciones estadounidenses sería 1:3, considerando los créditos por los coproductos, como el DDGS. En el caso de las emisiones, la producción del bioetanol de maíz implica una emisión total de cerca de 1.700 kg CO₂eq/m³ de bioetanol (igualmente considerando los créditos de los coproductos), que sería equivalente a una emisión neta evitada de 130 kg CO₂eq/m³ de bioetanol, cuando se considera su uso final, como se detalla en la Tabla 15. Nótese que ese valor es casi 15 veces inferior al observado en el caso del bioetanol de caña.

Tabla 15 – Balance de energía y emisiones de GEE en el caso del bioetanol de maíz en los EE.UU.

Flujos de energía	Valor
Consumo en la fase agrícola	5,59 MJ/litro
Consumo en la fase industrial	15,24 MJ/litro
Consumo total	20,83 MJ/litro
Producción de bioetanol	21,20 MJ/litro
Valor energético de los coproductos	4,13 MJ/litro
<i>Output</i> total	25,33 MJ/litro
Relación de energía (producción/consumo)	1,2
Balance de emisiones	
Fase agrícola	868 kg CO ₂ eq/m ³
Fase industrial	1353 kg CO ₂ eq/m ³
Coproductos	-525 kg CO ₂ eq/m ³
Emisión en la producción de bioetanol	1696 kg CO ₂ eq/m ³
Emisiones del bioetanol	81 g CO ₂ eq/MJ
Emisiones de la gasolina	94 g CO ₂ eq/MJ
Emisiones netas	134 kg CO ₂ eq/m ³

Fuente: Farrell et al. (2006) y EBAMM (2005).

Así como en el caso del bioetanol de caña, la producción de bioetanol de maíz también es una tecnología madura. De esa manera, se espera que los próximos avances en la búsqueda de un mejor desempeño ambiental para el bioetanol de maíz se concentren en el uso de la biomasa restante (paja), como combustible o como insumo para ampliar la producción de bioetanol, posiblemente a través de la hidrólisis. Sin embargo, cabe enfatizar que los límites para el aprovechamiento de esa biomasa son restringidos, dada su gran importancia para la preservación de la calidad del suelo.

Considerando otras opciones de biomasa para la producción de bioetanol, la situación no es muy distinta, por lo menos en los casos de la remolacha, el trigo y la mandioca, como se presenta en la Tabla 16, donde los valores de la relación de energía y de las emisiones evitadas son muy modestos [Dai et al. (2006), EBAMM (2005), IEA (2004), Macedo et al. (2007) y Nguyen et al. (2007)]. Hay que recordar la importancia de esos parámetros: la relación de energía representa la energía renovable producida en la cadena productiva del biocombustible, dividida por la cantidad de energía no renovable requerida para su producción. Las emisiones evitadas en esa tabla corresponden a la disminución del porcentaje de las emisiones, en relación a las emisiones del ciclo de vida de la gasolina, indicando, respectivamente, la consistencia energética y ambiental de cada ruta tecnológica para la producción de bioetanol.

Gracias a esos resultados, además de la caña que ya demostró sus ventajas energéticas y ambientales como fuente de bioenergía (particularmente de bioetanol), para el mediano-largo plazo la esperanza se encuentra en la producción de biocombustibles a base de materiales lignocelulósicos, considerando los criterios ambientales así como el potencial de producción. Sin embargo, no se trata todavía de una tecnología comercialmente utilizada. Para que esa posibilidad sea una opción viable en el futuro se necesita más investigación y demostraciones. Este tema se retomará en el Capítulo 6.

Tabla 16 – Comparación de las diferentes materias primas para la producción de bioetanol

Materia prima	Relación de energía	Emisiones evitadas
Caña de azúcar	9,3	89%
Maíz	0,6 – 2,0	-30% a 38%
Trigo	0,97 – 1,11	19% a 47%
Remolacha	1,2 – 1,8	35% a 56%
Mandioca	1,6 – 1,7	63%
Residuos lignocelulósicos*	8,3 – 8,4	66% a 73%

Fuente: Elaborado según Dai et al. (2006), EBAMM (2005), IEA (2004), Macedo et al. (2007) y Nguyen et al. (2007).

*Estimación teórica, proceso en desarrollo.

De esta manera, la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, posiblemente, sea uno de los efectos positivos más importantes asociados al bioetanol de caña de azúcar. De acuerdo con la Comunicación Brasileña para la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, con valores del año 1994, el uso de la energía de la caña redujo un 13% las emisiones de carbono de todo el sector energético. Para los volúmenes de producción de esa agroindustria en Brasil, en el año 2003, la sustitución de la gasolina por el bioetanol y la generación de energía con bagazo redujeron las emisiones de CO₂ equivalente, respectivamente, en 27,5 millones y 5,7 millones de toneladas [Goldemberg et al. (2008)]. Tomando una referencia para futuros cálculos en situaciones semejantes, por cada 100 millones de toneladas de caña destinadas a fines energéticos se puede evitar la emisión de 12,6 millones de toneladas de CO₂, considerando el bioetanol, el bagazo y el excedente de energía eléctrica suministrada a la red [Unica (2007)].



Capítulo 4

Coproductos del bioetanol de caña de azúcar

Además del bioetanol, la agroindustria de caña de azúcar produce una creciente gama de productos terminados y materias primas intermedias, que mejoran la inversión y permiten, mediante interesantes sinergias, agregarle valor al proceso total. Entre estos productos se destaca, naturalmente, el azúcar, que es el producto pionero y tradicional de esta industria. En los últimos años, la energía eléctrica producida en sistemas de cogeneración ha crecido y se intenta generar excedentes que puedan abastecer a la red pública. Esto mejora la producción económica de la agroindustria y aumenta la oferta global de electricidad en muchos países, como sucede en el Brasil. En este capítulo se analiza el proceso de fabricación de todos los productos extraídos de la caña que poseen un importante mercado y han desarrollado una alta tecnología. En el próximo capítulo se presentarán las nuevas posibilidades en desarrollo o en fase inicial de comercialización.

4.1 Azúcar y derivados

El azúcar, componente básico de la dieta humana moderna, está constituido, esencialmente, por sacarosa y se hizo conocido en el mundo occidental gracias a los árabes, que lo introdujeron en la Edad Media como especia de alto valor. El azúcar de caña comenzó a ser producido en Portugal a partir del cultivo en sus colonias del Atlántico y, debido a la amplia expansión del cultivo de caña en el Nuevo Mundo tropical, pasó a ser de un producto de uso restringido a las élites a mercancía de gran empleo en todo el mundo. El azúcar fue importantísimo en la formación de la economía brasileña y representó más que el oro o cualquier otro producto. Según relatan los intelectuales Gilberto Freyre y Câmara Cascudo, el azúcar ayudó a moldear la sociedad y los hábitos del pueblo brasileño. Esta importancia se observa también en muchos otros países donde la agroindustria de la caña fue y sigue siendo un elemento central de la actividad económica.

Actualmente, más de 130 países producen azúcar y su producción mundial en la cosecha 2006/2007 alcanzó los 164,5 millones de toneladas. Un 78% del total fue producido de la caña de azúcar cultivada, principalmente, en regiones tropicales y subtropicales del hemisferio sur. Lo demás se extrajo de la remolacha azucarera, cultivada sobre todo en las zonas templadas del Hemisferio Norte. Como los costos de producción de azúcar de caña son inferiores a los costos a base de la remolacha, cada vez se amplía más la fracción producida por los países en desarrollo, más aún cuando dejan de existir las barreras comerciales que impiden el libre comercio de este producto. De esta manera, se prevé que en el futuro, estos países serán los responsables de casi todo el crecimiento de la producción, ampliando su participación en la oferta mundial de azúcar de un 67% en el año 2000 a un 72% en 2010. La Tabla 17 muestra los principales productores y exportadores mundiales de azúcar, en la cosecha 2006/2007 [Illovo (2008)].

Tabla 17 – Principales países productores y exportadores de azúcar en la cosecha 2006/2007*

País	Producción (millón de ton)	Exportación (millón de ton)
Brasil	33.591	22.200
India	27.174	1.341
Unión Europea	16.762	1.228
China	11.630	–
Estados Unidos de América	7.661	–
Tailandia	7.011	4.528
México	5.543	380
África del Sur	5.419	2.339
Australia	5.156	3.958
Pakistán	3.813	–

Fuente: Illovo (2008).

*Valores preliminares.

Considerando esta cosecha, los cinco mayores exportadores – Brasil, Tailandia, Australia, África del Sur y Guatemala – abastecen cerca de un 80% de todas las exportaciones mundiales de mercado, exceptuando los mercados preferenciales o en cuotas. Esta conformación de los mercados de azúcar fue comentada en el Capítulo 2 y es interesante observar que la parte comercializada en los mercados internacionales es pequeña si la comparamos con la producción, ya que el 69% de la producción mundial es consumida, actualmente, en el país de origen [FAO (2007b)]. De este modo, las eventuales variaciones en el volumen producido en cada país pueden provocar cambios importantes en la disponibilidad del producto y, consecuentemente, en su precio, debido a las diferentes condiciones climáticas. Se puede tomar el ejemplo de India, que avanza hacia la primera posición entre los países productores de azúcar y en los últimos años produjo excedentes exportables. Mientras que, otros países se vuelven importantes importadores de este producto.

Además de la volatilidad natural de un mercado con suministro variable y una elasticidad-precio relativamente baja, las condiciones de mercado de los demás edulcorantes, como la glucosa de maíz (*high fructose corn syrup* – HFCS) y los dulcificantes de baja caloría (que en el año 2005 correspondían a un 18% del mercado mundial de dulcificantes) influyen en los movimientos del precio del azúcar en el mercado internacional. En este sentido, en los últimos años la glucosa de maíz, muy utilizada en la industria de alimentos, le cede su mercado al azúcar de caña, debido a la elevación del precio de su materia prima.

A lo largo de las últimas décadas, el consumo mundial de azúcar se ha expandido de forma regular, con una tasa anual de 2%, lo que significa un crecimiento de la demanda de 3 millones de toneladas por año. En los países en desarrollo, el crecimiento se debe, principalmente, al aumento de la renta de los consumidores y de los cambios en los estándares alimenticios. Estos mercados representan, actualmente, más del 60% del actual consumo mundial de azúcar, con expectativas de que los países asiáticos respondan por la mayor parte de la expansión de la demanda de este producto [FAO (2007b)]. Tal comportamiento se puede observar en el mercado de India, en el cual, en los últimos 25 años, el consumo *per capita* de azúcar pasó de 6 kg/año a 17 kg/año, mientras que el de otros dulcificantes tradicionales (gur y khand-sari, producidos artesanalmente de la caña) se redujo de 14 kg/año a 9 kg/año [India Infoline (2008)]. En China, otro mercado asiático importante, se espera que la población consuma 14 millones de toneladas de azúcar por año hasta el año 2010, total que representaría un consumo *per capita* de 10 kg/año, valor considerado bajo en el promedio mundial, que es de 24 kg/año [FAO (2007b)]. El Gráfico 11 representa el consumo anual *per capita* de azúcar en distintos países.

Además del azúcar común y del azúcar refinado, están surgiendo en el marco de la industria de caña productos dulcificantes diferenciados, con mejores precios para el productor, y que alcanzan segmentos específicos del mercado consumidor. Este es el caso del azúcar orgánico, producido sin agroquímicos ni aditivos artificiales, y de los azúcares mezclados con dulcificantes de bajas calorías, como el aspartamo o la sucralosa, producida en base a sacarosa de la caña de azúcar.

Las posibilidades del azúcar orgánico

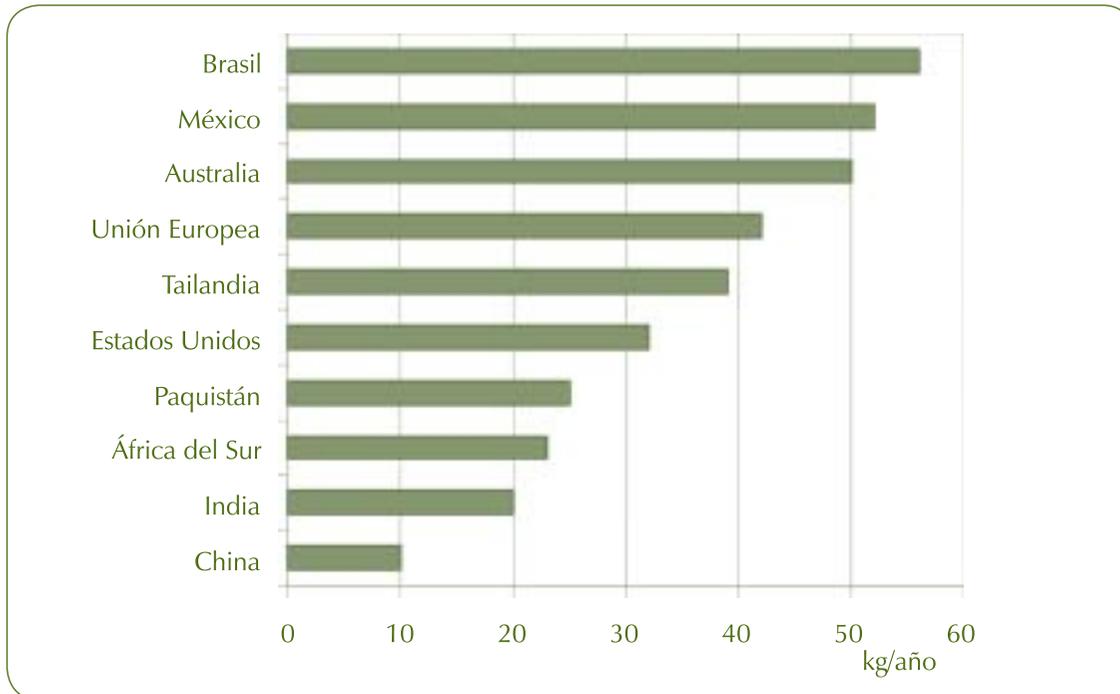
La evolución del comportamiento de los consumidores, valorando productos considerados más saludables y con menor concentración de aditivos químicos, viene abriendo un mercado interesante para la agroindustria de caña, con impactos ambientales positivos en la producción y en el procesamiento de caña de azúcar. Un buen ejemplo en ese sentido es presentado por el Grupo Balbo, que en 1986 inició el Proyecto Cana Verde, integrando de manera pionera tecnologías avanzadas con las tradicionales técnicas naturales de cultivo de la caña de azúcar, para ofrecer una línea de alimentos orgánicos, en la cual se destaca el azúcar Native, fabricado desde el año 2000 por la Planta São Francisco y actualmente comercializado en 40 países, respondiendo por casi un 22% de la facturación de este grupo.

Para que un producto agroindustrial sea considerado orgánico, no es suficiente que la materia prima utilizada sea cultivada sin agrotóxicos; por el contrario, es necesario repensar y adecuar todo el sistema productivo. La producción orgánica se asocia al manejo conservacionista y equilibrado de los recursos naturales utilizados, como tierra y agua, bajo una visión integrada y de respeto a la naturaleza, certificada en forma independiente por terceros. Aplicando este concepto en 13.400 hectáreas de cañaverales, totalmente certificados para la producción orgánica, en los cuales fueron ampliamente adoptados la cosecha de la caña cruda, el abonado orgánico (incluso con subproductos reciclados del procesamiento industrial), empleando variedades de caña con buena resistencia natural a plagas y el manejo de mazelas e insectos según técnicas manuales, mecánicas y biológicas. Bajo tales condiciones, el potencial ecológico de la caña es valorado y se preserva la fertilidad del suelo, con ganancias en los índices de productividad, que, tras algunos años de adaptación, resultan significativamente arriba del promedio de las demás plantas. La producción orgánica mantiene estándares elevados de desempeño ambiental también en la etapa industrial, con bajo uso de productos químicos y procedimientos de alto nivel para control del proceso, acompañamiento operacional y seguridad, de un modo general. Del mismo modo, se viene alcanzando la eficiencia energética mediante la implantación de sistemas de co-generación eficientes, con la obtención y la comercialización de créditos de carbono en los términos del Protocolo de Kyoto.

Como componente relevante de la producción de azúcar orgánico, la protección a la biodiversidad de la flora y de la fauna en el contexto de las áreas agrícolas viene siendo promovida con buenos resultados. Hubo un significativo esfuerzo para la formación y la recuperación de selvas con especies nativas y, en comparación a otras propiedades agrícolas de la misma región, la Planta São Francisco presenta hasta seis veces más especies de aves y una buena variedad de mamíferos, incluso carnívoros, como la onza parda y el lobo guará, según informaciones del Inventario de la Fauna realizado en la región, confirmando la recuperación de las cadenas ecológicas.

Todo el proceso agroindustrial y sus implicaciones ambientales son acompañados periódicamente por diversas instituciones certificadoras internacionales de Brasil, de los Estados Unidos, de Europa y de Japón [Native (2008)].

Gráfico 11 – Consumo de azúcar per capita en diversos países



Fuente: Illovo (2008).

La producción de azúcar, en base a diferentes materias primas y en diversos contextos, presenta una ancha franja de costos de producción. Brasil se destaca como el de menor costo entre todos los países productores, seguido por diversos países africanos [F. O. Licht (2007)]. Desde una perspectiva bioenergética, es importante mencionar que el bajo costo del azúcar brasileño está, en gran parte, relacionado al desarrollo de la tecnología agrícola e industrial de este sector, asociado a la expansión de la producción de bioetanol. Además, el bajo costo se debe al hecho de que la propia producción azucarera se procesa junto a la fabricación de bioetanol, como ya se explicó en el capítulo anterior, lo que confiere importantes ventajas operacionales y de calidad de producto. En pocas palabras: Brasil logró volverse el mayor productor de azúcar y con el menor costo porque asoció su producción al bioetanol.

4.2 Bioelectricidad

En el caso de la caña, un tercio de la energía solar que esta absorbe se transforma en azúcar, el resto corresponde a fibra vegetal, compuesta de celulosa, hemicelulosa y lignina, que constituyen el bagazo y la paja de la caña de azúcar. El uso de estos biocombustibles se vuelve más importante debido al bagazo, que es muy empleado como fuente de energía, especialmente en la agroindustria de caña.

En el procesamiento industrial de la caña son necesarios tres tipos de energía: energía térmica para los procesos de calentamiento y concentración, energía mecánica en las molientes y demás sistemas de accionamiento directo, como bombas y ventiladores de gran tamaño, así como energía eléctrica para accionamientos diversos, bombeo, sistemas de control e iluminación, entre otros fines. Para poder cumplir con estas demandas energéticas se realiza, en las plantas de azúcar y de bioetanol, la producción simultánea de estos diferentes tipos de energía, todas extraídas del mismo combustible: el bagazo. Tal tecnología es denominada cogeneración y representa una ventaja importante de la caña, en relación con otras materias primas utilizadas para la fabricación de azúcar o bioetanol, que necesitan aporte energético externo durante el proceso industrial.

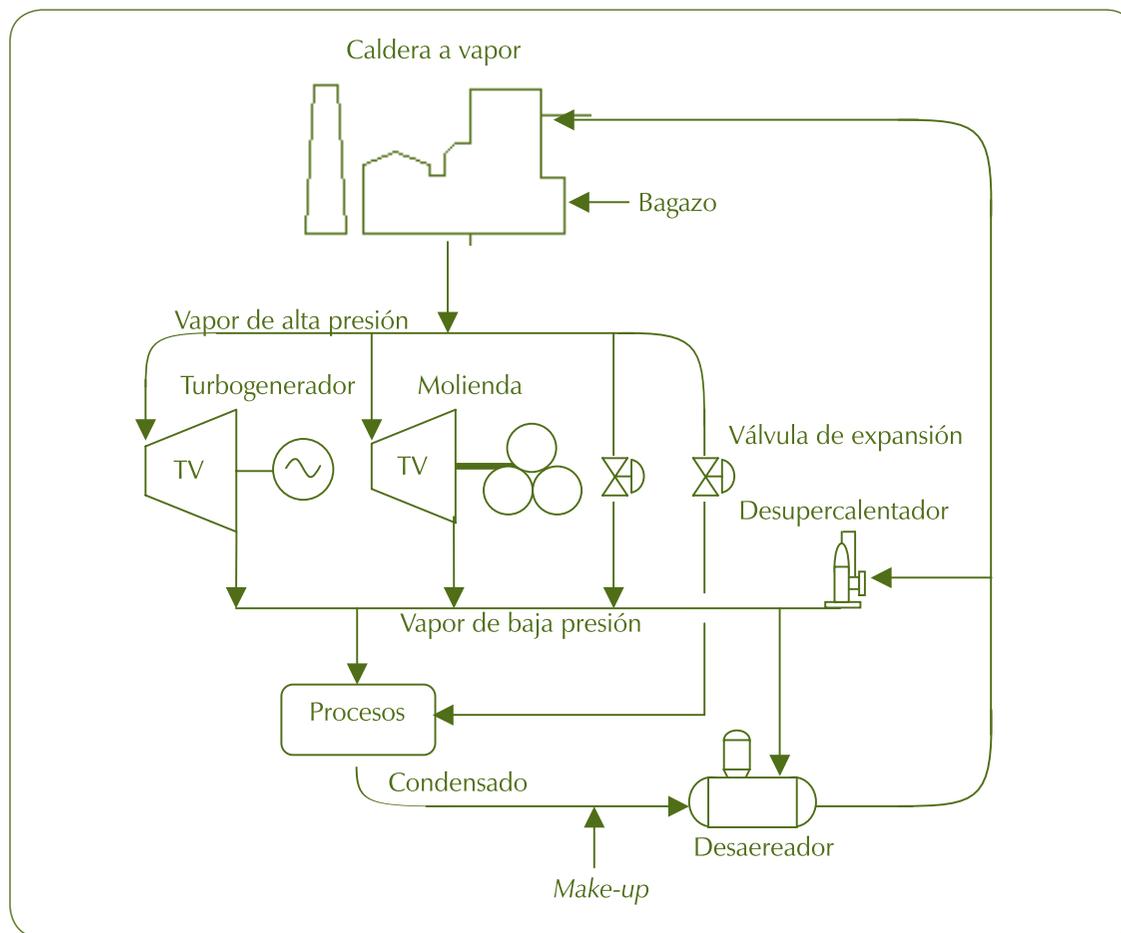
La Figura 18 muestra el esquema que se utiliza, generalmente, en el sistema de cogeneración de la agroindustria de caña en todo el mundo, en el cual las principales variaciones ocurren en la presión del vapor producido en las calderas [Seabra (2008)]. En síntesis, utilizando el calor liberado por la combustión del bagazo en las calderas se produce vapor de alta presión, utilizado en turbinas a vapor para generación eléctrica y accionamientos mecánicos, cuyo vapor de escape, a baja presión, sirve para usos térmicos. Esta concepción básica ofrece distintas variantes constructivas, que pueden aumentar la producción de energía eléctrica por tonelada de caña procesada, naturalmente, una vez que se realicen mayores inversiones. Aunque en la agroindustria, prácticamente, sólo se utilice el bagazo como combustible, se pueden incorporar también parte de los residuos de cosecha, o sea, la paja de la caña de azúcar.

En condiciones normales, el balance de vapor de una planta es, en general, equilibrado, es decir, la oferta cubre la demanda. Por lo tanto, se puede afirmar que, a lo largo de su desarrollo, esta agroindustria se ha transformado para mantener cierto equilibrio, compensando los incrementos del volumen de azúcar a procesar, resultantes de mejoras en la calidad de la caña, con ventajas en la eficiencia de los sistemas de generación y uso de vapor. En la actualidad, al analizar valores representativos de las plantas brasileñas, similares a la de otros países, se concluye que, en el procesamiento de una tonelada de caña la disponibilidad de bagazo (con un 50% de humedad) es del orden de 250 kg, o sea, permite producir entre 500 kg y 600 kg de vapor, la misma cantidad que se consume durante el proceso, entre 400 kg y 600 kg de vapor [Leal (2007)]. De esta manera, con una gestión responsable de las demandas de vapor y con la adopción de calderas más eficientes se podrían obtener sobras de bagazo. Igualmente, la principal ventaja sucede en la etapa de generación de potencia, anterior al uso del vapor en el proceso.

Estas ganancias son posibles porque, durante la producción de energía eléctrica y mecánica en la agroindustria de la caña, se cuenta con un grado de libertad importante, ofrecido por la condición del vapor producido en las calderas y utilizado, inicialmente, por las turbinas a vapor. Mientras que, por imposición del proceso industrial, la presión del vapor cuando sale de estas turbinas se acerca a 2,5 bar, a la entrada se puede elegir entre una amplia franja, dependiendo de la caldera empleada, y generando una potencia proporcional a su energía

térmica, función de presión y temperatura a la hora de salir de la caldera. Prácticamente, sin modificar la cantidad de combustible, se puede aumentar la producción de energía eléctrica en la agroindustria de la caña, utilizando calderas y turbinas que operen con vapor a presión y temperaturas más elevadas.

Figura 18 – Configuración usual del sistema de cogeneración en la agroindustria de la caña



Fuente: Seabra (2008).

Es interesante observar que, durante las últimas décadas, los parámetros del vapor se han incrementado progresivamente en el caso brasileño, y esa evolución se transporta a otros países [Horta Nogueira (2006a)]. Hasta 1980, las plantas del estado de São Paulo poseían calderas con presiones entre 12 bar. y 22 bar. y compraban el 40% de la energía eléctrica consumida. Desde 1990, con la paulatina sustitución de las calderas y turbinas antiguas, la presión media del vapor en estas plantas alcanzó 22 bar, con temperaturas de 300° C, suficientes como para alcanzar la autosuficiencia en el suplemento de energía eléctrica y la producción de algún

excedente para la venta. En condiciones normales, las plantas brasileñas consumen como potencia de eje, en la preparación y molienda de la caña, cerca de 16 Kwh. por tonelada de caña. Esa cantidad se suma a la demanda de energía eléctrica, del orden de 12 Kwh. por tonelada de caña [Macedo et al. (2006)]. Así, plantas con capacidad de generación superior a 28 Kwh. por tonelada de caña procesada típicamente pasan a disponer excedentes energéticos para la comercialización en la red pública.

Con la reciente valorización de esos excedentes y la posibilidad de venta de energía eléctrica a las concesionarias surge, en muchos países, un nuevo ciclo de modernización de los sistemas de cogeneración de la agroindustria de caña. Para lograr esto, las distintas plantas implantan sistemas, que utilizan presiones elevadas y significativas para la producción de excedentes de bioelectricidad. Al estimular la generación de energía eléctrica durante el cultivo de caña, utilizando la demanda con mayor eficiencia y menor impacto ambiental en el sector energético, se promueve también la evolución del marco regulador del sector eléctrico y el desarrollo de tecnologías para el control de los sistemas de cogeneración de tamaño medio.

En términos de eficiencia, la cogeneración es, intrínsecamente, muy superior a la generación termoeléctrica convencional. Las tecnologías termoeléctricas convencionales convierten en energía útil casi un 30% y, en condiciones-límite, hasta un 50% de la energía suministrada por el combustible, rechazando inevitablemente una parte relevante de energía térmica del medio ambiente. Al utilizar el calor rechazado para suplir las necesidades térmicas de proceso, los sistemas de cogeneración permiten obtener cantidades superiores al 85% en el uso de la energía del combustible, con evidentes beneficios en la economía y en la reducción de los impactos ambientales. A pesar de estas ventajas, la postura monopólica de las empresas de energía eléctrica y la rigidez del marco regulatorio, prácticamente impedían la operación entre autoprodutores así como la transacción de los excedentes disponibles. Afortunadamente, estas condiciones han evolucionado de manera positiva y, en diversos países, la agroindustria de caña se vuelve, cada vez más, un agente importante en la oferta de energía eléctrica. En este sentido, el caso brasileño es emblemático: en los primeros cinco años de la década actual, la oferta de energía de caña de azúcar se expandió hacia la red pública, a una tasa anual del 67% [Moreira y Goldemberg (2005)].

Con la posibilidad de comercializar los excedentes de bioelectricidad, las plantas de azúcar y bioetanol pasaron también a valorar los residuos sólidos de la cosecha, que pueden incrementar aún más la disponibilidad de energía eléctrica. Naturalmente, el uso de la paja de la caña de azúcar en las calderas, representando cerca de 140 kg por tonelada de caña cosechada, plantea nuevos interrogantes relacionados al uso de este biocombustible en la cosecha, la manipulación y en todo el proceso. Pero, de a poco, los resultados exitosos demuestran que estos biocombustibles son rentables y pueden ser utilizados en las plantas industriales a precios convenientes (entre U\$S 0,80 y U\$S 1,80 por GJ). Sin embargo, se recomienda que cerca de la mitad de la paja se mantenga en el suelo, por razones agronómicas, para lograr la reducción de la erosión, el reciclaje de nutrientes y el mantenimiento de un nivel mínimo de humedad en el suelo [Hassuani et al. (2005)]. Otro tema asociado a la generación de

bioelectricidad para ser comercializada se relaciona con la operación en períodos fuera de la cosecha, cuando no hay demanda de calor del proceso y se realiza el almacenamiento de bagazo. Esto también se está implementando en plantas de varios países con resultados favorables, siempre dependiendo de la matriz de oferta energética y de las condiciones particulares de despacho.

En la Tabla 18 se muestra cómo las condiciones del vapor afectan directamente la generación de excedentes energéticos en las plantas de azúcar y bioetanol. Para el cálculo de estos valores se consideraron: una producción de 280 kg de bagazo (50% de humedad) por tonelada de caña, vapor para el proceso a 2,5 bar. de presión y el uso de turbinas a vapor de contrapresión, excepto en los casos en que se realice la operación fuera de la cosecha o con bajos consumos de vapor de proceso, situaciones que imponen el empleo de turbinas de condensación, con el condensador operando a 0,12 bar. En ambos casos, en los que se considera el uso de la paja, se asume que un 50% permanece en el campo, lo que significa una disponibilidad efectiva de 70 kg de este biocombustible por tonelada de caña cosechada.

Como se observa en la Tabla 18, hay un importante incremento de los excedentes de energía eléctrica exportable asociado a la elevación de la presión. Además, en el contexto evaluado, con la reducción del consumo del vapor de proceso de 500 kg a 350 kg de vapor por tonelada de caña procesada (kg /tc), se obtiene un aumento de 24% en los excedentes de energía eléctrica. Con la utilización parcial de la paja, los excedentes se amplían a un 141%. También, vale la pena observar que, en Brasil, se han implementado sistemas de cogeneración con calderas operando arriba de 90 bar, con una generación estimada de 146 Kwh. por tonelada de caña, destinados a la red pública [Seabra (2008)]. En otro estudio se indica que, considerando la tecnología más eficiente ahora disponible en los sistemas a vapor para las plantas de azúcar – con generación de vapor a 105 bar. y 525° C, reducción de la demanda de vapor de proceso a 280 kg por tonelada de caña, aprovechamiento total del bagazo y del 50% de las puntas y hojas, con operación durante todo el año –, sería posible producir excedentes de 158 Kwh. por tonelada de caña procesada, luego destinada a la red de la concesionaria [Walter y Horta Nogueira (2007)].

Las tecnologías en desarrollo utilizando turbinas a gas, asociadas a gasificadores, presentadas en el próximo capítulo, permitirán elevar la energía generada a niveles superiores a 180 KWh.

Analizando la operación de una planta de azúcar y bioetanol ubicada en el centro-sur brasileño, con una molienda anual de 2 millones de toneladas de caña, sistemas de cogeneración convencionales a 65 bar. y 480° C poseen una capacidad de generación de 31 MW, mientras que, en el caso de sistemas optimizados a 90 bar. y 520° C, esa potencia pasa a ser de 82 MW durante la cosecha [Seabra (2008)]. Al analizar la posibilidad de alcanzar ganancias energéticas significativas gracias al uso de altos parámetros de vapor en los sistemas de cogeneración, debemos considerar la opción de presiones más elevadas, y el hecho de que aumentar la generación de energía eléctrica excedente implica realizar inversiones proporcionalmente más elevadas. La amortización del proceso depende, entre otras variables, de las tarifas, del marco regulador y de las perspectivas de oferta en el sector eléctrico, condiciones esencialmente

externas al negocio de las plantas. No obstante, como señala el caso brasileño, es notable la expansión de la capacidad de generación de las plantas de azúcar [CGEE (2005)].

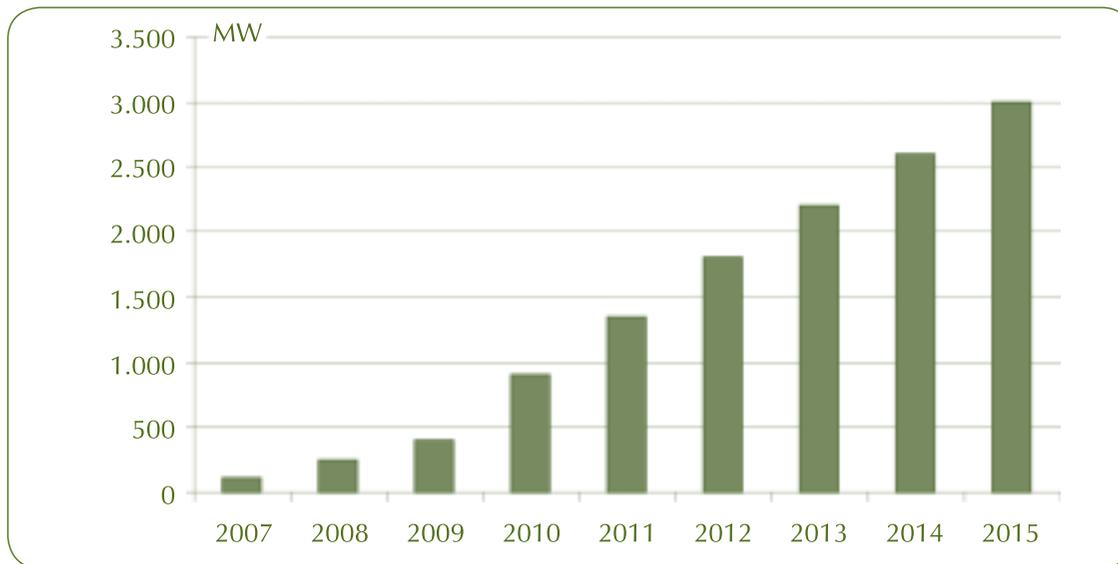
Tabla 18 – Energía eléctrica y bagazo excedente en sistemas de cogeneración en la agroindustria de la caña

Parámetros del sistema de cogeneración	Consumo de vapor en el proceso	Período de generación	Uso de la paja	Energía eléctrica excedente	Bagazo excedente
21 bar, 300° C	500 kg/tc	cosecha	no	10,4 kWh/tc	33 kg/tc
42 bar, 400° C	500 kg/tc	cosecha	no	25,4 kWh/tc	50 kg/tc
42 bar, 450° C	500 kg/tc	cosecha	no	28,3 kWh/tc	48 kg/tc
65 bar, 480° C	500 kg/tc	cosecha	no	57,6 kWh/tc	13 kg/tc
65 bar, 480° C	350 kg/tc	cosecha	no	71,6 kWh/tc	0 kg/tc
65 bar, 480° C	500 kg/tc	año todo	50%	139,7 kWh/tc	13 kg/tc
65 bar, 480° C	350 kg/tc	año todo	50%	153,0 kWh/tc	0 kg/tc

Fuente: CGEE (2005).

Según los registros de la Agencia Nacional de Energía Eléctrica (Aneel), en marzo de 2008, la capacidad de generación eléctrica calculada en base al bagazo de caña alcanzaba 3.081 MW, mientras que otros 460 MW estaban siendo procesados o esperaban permiso para ser utilizados [Aneel (2008)]. Considerando los valores de 2006, estas centrales produjeron 8.357 GWh, casi un 2% de la producción brasileña de electricidad [MME (2008)]. Ese dato corresponde únicamente al Estado de São Paulo, responsable por el 60% del total de la producción brasileña de azúcar y bioetanol y cuyas 131 plantas procesaron 264 millones de toneladas de caña en la cosecha 2006/2007, con una capacidad de 1.820 MW, con excedentes de 875 MW, utilizados en la red pública [Silvestrin (2007)]. También, considerando sólo el estado de São Paulo, se prevé una expansión muy importante de la agroindustria de caña en la generación de excedentes de energía eléctrica, como muestra el Gráfico 12. En el caso de Brasil, la capacidad de generación de energía eléctrica para la red pública en base al bagazo podrá alcanzar 15 GW hasta 2015, el 15% de la actual potencia instalada en las centrales eléctricas brasileñas. La intención es que, en las plantas más modernas, los resultados económicos de la producción de bioelectricidad se equiparen a los de la producción de azúcar, incluyendo la producción de bioetanol, azúcar y energía eléctrica [F. O. Licht (2008a)]. Considerando las demandas previstas de bioetanol y las disponibilidades de bagazo relacionadas con su producción, Walter Horta Nogueira (2007) estiman que, en el año 2025, la capacidad de producción podría llegar a 38,4 GW (en el caso de que se utilice el bagazo para la producción de bioetanol por hidrólisis y si las calderas emplean sólo el 60% de la paja disponible) o 74,7 GW (en el caso de que todo el bagazo y el 60% de la paja se usen para producir bioelectricidad).

Gráfico 12 – Posibilidad de instalación de sistemas de cogeneración en las plantas de azúcar y bioetanol en el Estado de São Paulo, en los próximos años



Fuente: Silvestrin (2007).

A partir del probable desarrollo de procesos de producción de bioetanol con el bagazo, vale la pena analizar las condiciones de competitividad relativa de esta biomasa; o sea, cabe buscar los caminos de mayor atracción económica. Por eso, se presenta a continuación una evaluación comparativa preliminar del valor económico entre dos productos alternativos del bagazo – la bioelectricidad y el bioetanol por hidrólisis. En el Gráfico 13, el valor económico del bagazo se define por la tarifa de venta de energía eléctrica, considerando los valores de costo unitario de la capacidad de generación eléctrica. De la misma manera, en el Gráfico 14 se estima el valor del bagazo que es utilizado durante la producción de bioetanol por hidrólisis (que será mejor discutida en el próximo capítulo), analizando una productividad de 378 litros de bioetanol por tonelada de bagazo seco. En ese caso, los valores de costo del capital y la operación de la unidad industrial se tomaron de algunos estudios realizados, dependiendo del nivel de madurez tecnológica. Se calcula entre U\$S 0,26 y U\$S 0,13 por litro de bioetanol producido, en el caso de un plazo corto y luego del año 2010, respectivamente [IEA (2005)].

Los Gráficos 13 y 14 nos permiten llegar a una interesante conclusión. El valor del bagazo para la producción de energía eléctrica, teniendo en cuenta las tarifas usuales de energía eléctrica (superior a U\$S 60 por Kwh., en valores del año 2005) y los precios de mercado del bioetanol (alrededor de los U\$S 0,50 por litro), indica que conviene más producir bioelectricidad que bioetanol, por lo menos con los precios actuales de los vectores energéticos. En principio, esta constatación no depende de aspectos estratégicos relacionados a la planificación energética, que refuerzan la importancia de la oferta de electricidad, en el caso brasileño, y de combustibles líquidos, en el caso estadounidense.

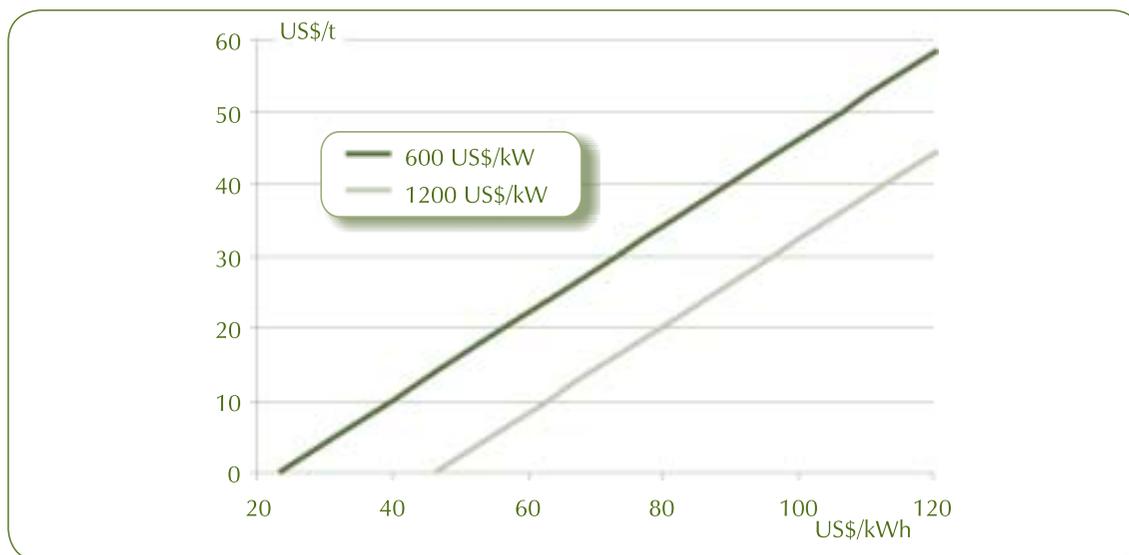
Evolución de la producción de electricidad en una planta brasileña



Usina Vale do Rosário, del grupo Santelisa Vale.

Un ejemplo representativo de la evolución por la cual vienen pasando las plantas de azúcar y etanol en el Brasil, buscando mayores excedentes de energía eléctrica, es dado por la Usina Vale do Rosário [Heck (2006)]. Localizada en Morro Agudo, São Paulo, esta planta procesa actualmente alrededor de 5 millones de toneladas de caña por cosecha. En 1986, se iniciaron las modificaciones en su sistema energético, que en esa época atendía toda la demanda agroindustrial, pero sin excedentes. La motivación para la introducción de perfeccionamientos fue dada por la existencia de potencial para la producción de más energía eléctrica (gran expansión de vapor directo para atender a la demanda de vapor de escape y excedentes de bagazo) y la postura favorable de la concesionaria (CPFL) para la adquisición de excedentes. En una primera fase, manteniendo las calderas operando a 22 bar e 280° C, se introdujeron turbinas a vapor más eficientes y procedimientos para racionalización del uso de vapor, que permitirían, en la cosecha de 1993, una producción de 4,7 Kwh. excedentes por tonelada de caña procesada y el establecimiento de un contrato de diez años con CPFL para la venta de 4 MW durante la cosecha. En una segunda fase, implementada entre 1995 y 1997, se adquirieron dos calderas nuevas para 44 bar y 430° C y un turbogenerador de 12 MW, que incrementaron la producción de excedentes a 16,5 k.o. por tonelada de caña y justificaron un nuevo contrato con CPFL para la venta de 15 MW a partir de 1998, motivando la construcción de una nueva subestación y una línea de transmisión de 16 Km. en 138 kV. En la fase siguiente, completada en 2001, se instalaron nuevos turbogeneradores, utilizando turbinas de extracción/condensación y que permitieron renovar el contrato con la concesionaria para la entrega de 30 MW. En la última fase, concluida en 2005, se introdujo una caldera produciendo 200 toneladas de vapor por hora, a 65 bar y 515° C, que llevaron la planta a una generación de 65 MW excedentes, correspondientes a 60 Kwh. por tonelada de caña procesada.

Gráfico 13 – Valor del bagazo utilizado para producir electricidad



Fuente: Elaboración de Luiz Augusto Horta Nogueira.

El uso del bagazo para la generación de energía eléctrica permite reducir las emisiones de carbono hacia la atmósfera, ya que reemplaza el aceite combustible quemado por las termoeléctricas convencionales, durante la época de la cosecha, que ocurre en los meses de baja hidráulidad y menor capacidad de generación hidroeléctrica. En este caso, la reducción de emisiones es del orden de 0,55 tonelada de CO₂ por tonelada de bagazo utilizado. Esta reducción de emisión de gases de efecto invernadero sirve para obtener créditos de carbono. Los proyectos de este tipo se tiene que acompañar (la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero se debe agregar a aquellas que sucedían cuando no se realizaba esta actividad) con una metodología de línea de base consolidada y aprobada (Método AM0015 – «Cogeneración en base al bagazo interconectado a una red eléctrica») para cuantificación y certificación de esos créditos (reducciones certificadas de emisiones, RCEs), en los términos del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), como quedó establecido por lo Protocolo de Kyoto.

En el caso brasileño, la responsabilidad por la conformidad y el seguimiento de los proyectos de MDL es de la Comisión Interministerial de Cambio Climático Global (CIMGC), vinculada al Ministerio de Ciencia y Tecnología. Hasta marzo de 2008 existían 24 proyectos brasileños de cogeneración con bagazo de caña registrados en la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (UNFCCC), correspondiendo a una reducción total de 461 mil toneladas en las emisiones anuales de CO₂. Los factores de emisión adoptados dependen de la región donde los proyectos se localizan, valiendo 0,136 y 0,2826 toneladas de CO₂ equivalente por Kwh. generado, respectivamente, en el Nordeste y en el Centro-Sur, en el período de 2004 a 2006 [MCT (2008) y Ecoinvest (2008)].

Gráfico 14 – Valor del bagazo utilizado para la producción de etanol



Fuente: Elaboración de Luiz Augusto Hosta Nogueira.

Para finalizar la discusión sobre la bioelectricidad como un coproducto relevante de la agroindustria de caña, vale la pena comentar el potencial del desarrollo tecnológico en este campo. En el capítulo siguiente se abordará, más detalladamente, el proceso de gasificación del bagazo, que podrá incrementar de modo significativo la generación de energía eléctrica, con expectativas de producción superiores a 180 Kwh. por tonelada de caña procesada. Otro proceso que motivó nuevos estudios para la producción de bioelectricidad es la biodigestión de la vinaza, que, sin reducir su potencial fertilizante, podrá proporcionar excedentes adicionales de energía eléctrica en las plantas de bioetanol. Se estima que la vinaza resultante de la producción de un metro cúbico de bioetanol, tratada en forma anaeróbica (en la ausencia de oxígeno), produce 115 metros cúbicos de biogás, capaces de generar, a su vez, 169 Kwh. de bioelectricidad, habiendo descontado los consumos del proceso [Lamonica (2006)]. No obstante, los elevados costos asociados a la biodigestión de la vinaza aún limitan el interés en este proceso.

En una evaluación de las posibilidades futuras de la conversión energética en la agroindustria de la caña, analizando diferentes productos y posibilidades tecnológicas, disponibles en los próximos 20 años, Macedo (2007) estima que se podría rescatar hasta un 59% del contenido energético total de la caña, como biocombustible y bioelectricidad, un rendimiento bastante superior al actual 38%. En el caso específico de la energía eléctrica, analizando la explotación de los límites termodinámicos de la producción de energía eléctrica a base de la caña, en escenarios tecnológicos más avanzados, Lora et al. (2006) consideraron diferentes alternativas

complementarias y asociadas a dos escenarios básicos: aumento de la producción de combustibles y aumento de la generación de bioelectricidad. En este sentido, con la utilización de tecnologías aún en desarrollo o reducida difusión, como el caso de los gasificadores de bagazo asociados a turbinas a gas, biodigestores de vinaza y células de combustible que utilizan bioetanol reformado, sería posible alcanzar más que 510 Kwh. de energía eléctrica por tonelada de caña procesada. Vale la pena observar que este potencial representa, efectivamente, apenas un 25% del potencial energético de la caña, considerando la energía disponible en el azúcar y en la fibra, del orden de 7.200 MJ por tonelada de caña. En otras palabras, el límite superior de la producción de energía eléctrica basado en la caña es decenas de veces superior a la generación media actualmente observada en las plantas brasileñas, que recién ahora se ha comenzado a desarrollar.

4.3 Otros coproductos del bioetanol de caña de azúcar

Así como sucede con el maíz, que da origen a una amplia gama de productos, la caña de azúcar permite producir mucho más que bioetanol, azúcar y electricidad. Entre todos los coproductos tradicionales de la caña se podrían citar la melaza, el aguardiente, el bagazo, la levadura, la torta de filtro y la vinaza. Y la lista de nuevos productos que podemos mencionar incluye desde realzadores de sabor para la industria de alimentos hasta plástico para embalajes. Un minucioso estudio publicado en Brasil, en el año 2005, menciona más de 60 tecnologías que emplean la caña de azúcar como materia prima en distintos sectores industriales [IEL/Sebrae (2005)], que fue la principal fuente de informaciones para esta sección. Al inicio se presentan breves comentarios sobre los productos tradicionales y, a continuación, se comentan los productos innovadores, gran parte de éstos relacionados a la industria de alimentos. Los productos que aún se encuentran en desarrollo se comentarán en el próximo capítulo.

La melaza – miel pobre o miel residual de la fabricación de azúcar – es muy usada para la producción de bioetanol en las destilerías encontradas en las plantas, pero también se la puede utilizar para la alimentación animal o para el cultivo de hongos y bacterias, pasando por otros procesos de fermentación dirigidos a la fabricación de productos químicos y farmacéuticos, así como a la producción del fermento biológico bastante empleado en la panificación. La levadura es el extracto seco obtenido mediante tres procesos alternativos: el secado del caldo de la levadura, del fondo de cuba o también de la vinaza, constituyendo un suplemento proteico de bajo costo, empleado como ingrediente del alimento balanceado animal y en la industria de alimentos. Se estima que, por cada litro de bioetanol se producen entre 15 y 30 gramos de levadura seca [Leal (2008) y Pesquisa Fapesp (Investigación Fapesp) (2002)].

El bagazo sirve, principalmente, como combustible, además de constituirse en una fuente importante de celulosa para las industrias de papel y cartón. En São Paulo, el bagazo se comercializa mucho gracias a su capacidad energética y también se usa regularmente en industrias cerámicas y en el procesamiento de la naranja, entre otras. Tal vez se pueda investigar el bagazo para intentar mejorar su digestibilidad e incorporarle fuentes de nitrógeno para usarlo en la

alimentación bovina. La vinaza y la torta de filtro poseen un gran valor como fertilizantes y son muy utilizados en la agroindustria, que absorbe toda la disponibilidad de estos productos en la reforma y mantenimiento de la fertilidad de los cañaverales.

Generalmente, el gas carbónico producido en las cubas de fermentación se lava para recuperar el bioetanol arrastrado y liberado en la atmósfera. También se lo puede purificar, desodorizar, licuar y almacenar bajo presión para otros fines, como pueden ser la producción de gaseosas y de hielo seco, la fabricación de bicarbonato de sodio y el tratamiento de efluentes. Del balance de masa en la fermentación, se concluye que, en la fabricación de mil litros de bioetanol anhidro se producen hasta 760 kg de gas carbónico. Algunas plantas brasileñas de bioetanol han implementado unidades de beneficiamiento de gas carbónico, como la *Planta JB Açúcar e Álcool*, en Vitória de Santo Antão, en Pernambuco, que durante la cosecha produce 528 toneladas mensuales de gas carbónico para uso alimentario [Carbogás (2008)].

Si por un lado, los productos tradicionales antes mencionados son capaces de agregar valor en forma limitada a la producción de bioetanol (tanto que se los denomina subproductos), por otro, los productos innovadores representan el resultado de la incorporación de tecnologías de mayor complejidad, con un mejor resultado económico, y que suponen siempre una etapa más de procesamiento, como sucede en la producción de ácidos y aminoácidos a través de la fermentación. La Tabla 19 ofrece una visión general de los nuevos productos de la caña de azúcar, algunos ya se comercializan y otros aún no (modificado de IEL/Sebrae, 2005). Este mercado presenta buenas perspectivas porque, entre otras razones, está formado por productos que son menos agresivos para el medio ambiente y, en algunos casos, se aplican en sectores económicamente importantes.

En Brasil, el ácido cítrico es producido hace décadas, a través del proceso de fermentación, utilizando plantaciones del hongo *Aspergillus niger* en substrato de melaza disuelto en agua. Este ácido es un insumo usado para la preservación de alimentos y como saborizante. Sirve también para la limpieza de equipos industriales y la fabricación de detergentes y otros productos de higiene y limpieza. Las dificultades económicas para su producción tienen que ver con el mantenimiento de cepas productivas y un control riguroso de las condiciones del ambiente.

Entre los aminoácidos que se producen a través de la fermentación de azúcares se destaca la lisina, cuyo mercado principal, además de las aplicaciones farmacéuticas, es la fabricación de alimento para aves y porcinos, que está creciendo bastante. Se considera que este aminoácido es esencial para los animales que, así como los seres humanos, no tienen las vías enzimáticas para sintetizarlo, requiriendo un suplemento alimenticio. Además, gran parte del alimento animal está compuesto por carbohidratos vegetales y no posee suficiente lisina asimilable, por eso es importante agregarla. De ahí la importancia de la lisina, cuyas importaciones brasileñas en los últimos años fueron del orden de 10 mil toneladas por año.

Tabla 19 – Nuevos productos de la agroindustria de la caña de azúcar

Familia	Materia prima	Productos
<i>Biotechnológicos</i> : materiales producidos en base a las funciones biológicas de organismos vivos	Melaza	a) Ácido cítrico b) Aminoácidos: lisina c) Defensivos agrícolas: regulador de crecimiento o fitorreguladores (ácido indolacético, ácido jasmónico), plaguicida (biofungicida, controlador biológico, insecticida biológico, plaguicida biológico) d) Fijador de nitrógeno e) Inóculo para silaje
<i>Químicos</i> : productos resultantes de reacciones químicas efectuadas con o sin la presencia de un elemento catalizador	Melaza, bagazo y vinaza	a) Insumos industriales (dextrana técnica, gluconato de calcio, manitol, sorbitol y tensoativos biodegradables) b) Furfural (licor de xilosa, furfural, alcohol furfúrico, compuestos furano epoxi, preservante de madera, resinas de fundición) c) Plásticos (PHB y PHB/hl, PHA mcl/PHB hpe). d) Insumos para la industria de papel y pulpa (medio para corrugar, pastas quimtermomecánicas, medios filtrantes) e) Vinaza concentrada
<i>Fármacos veterinarios</i> : sustancias químicas, biológicas, biotecnológicas o de preparación manufacturera, directamente administradas o mezcladas a los alimentos, destinadas a prevenir y tratar las enfermedades de los animales	Melaza y bagazo	a) Preparado antidiarreico b) Complejo hierro-dextrana c) Probiótico
<i>Alimentos</i>	Melaza, bagazo y vinaza	a) Derivados de la levadura, fructosa y glucosa b) Frutooligosacarídeos c) Jarabes invertidos por vía enzimática d) Setas comestibles de la especie <i>Pleurotus ostreatus</i> .
<i>Biológicos</i>	Bagazo	a) Compuesto fertilizante
<i>Estructurales</i> : materiales cuyas propiedades los vuelven utilizables en estructuras, máquinas o productos consumibles	Bagazo	a) Aglomerados de bagazo/cemento b) Aglomerados MDF

Fuente: Modificado de IEL/Sebrae (2005).

Vale la pena observar las maneras como la agroindustria de la caña se ha diversificado en Brasil, en un ambiente de mayor complejidad tecnológica y generación de valor, en el cual la implementación de procesos dirigidos a nuevos productos de la caña de azúcar se bifurca en dos vertientes. En la primera, la industria sucroalcoholera intenta diversificar su línea de productos, como ocurrió con el grupo Zillo Lorenzetti al fundar, al final del año 2003, Biorigin, una empresa de biotecnología especializada en la producción de ingredientes naturales para la industria de alimentación humana y animal. O como sucede con todas las empresas que han implementado procesos de secado de levadura para su comercialización, por ejemplo, en las plantas Santa Adélia, São Martinho, Santo Antônio, São Francisco, Viralcool, Planta Andrade, São Carlos, Galo Bravo, Cresciumal, Santa Cruz OP, Jardest, São José da Estiva, Cerradinho, Equipav, Nova América, Pitangueira y Bonfim [IEL/Sebrae (2005)]. Aproximadamente, un 50% de la levadura producida se destina al mercado interno, en el cual se la utiliza en la alimentación de aves (casi un 50%) y porcinos (un 30%). El otro 50% de la producción total se exporta, en su mayor parte (un 80%) a países del Sudeste Asiático, donde la levadura se usa para alimentar peces y gambas. Considerando un precio de referencia de U\$S 12,5 por kg de levadura seca [IEL/Sebrae (2005)], la producción de levadura permite obtener entre U\$S 187 y U\$S 375 por cada mil litros de bioetanol producido, un resultado muy importante en términos del rendimiento económico del proceso agroindustrial.

En la segunda vertiente del desarrollo de este segmento aparecen otros sectores industriales, como el alimenticio y el químico, que vienen incorporado de forma creciente materias primas asociadas a la caña. En este sentido, la empresa Alltech, una multinacional del ramo de los alimentos para animales, instaló en el año 2005, junto con la Planta Vale do Ivaí, en Paraná, una unidad de producción de levadura con capacidad para 50 mil toneladas anuales, la cual destina el 80% de la producción al mercado externo [JornalCana (2005)]. Este también es el caso de las empresas Ajinomoto, de Japón, y Cheil Jedang, de Corea del Sur, que instalaron en Brasil unidades dirigidas a la producción de lisina, aprovechando la tecnología y el bajo costo del azúcar, materia prima que pasa a reemplazar al maíz y la soja, utilizados en otros países. Juntas, las dos nuevas fábricas pasarán a producir 180 mil toneladas por año. Las ventajas económicas son importantes: transformada en lisina, la bolsa de 50 kilos vale U\$S 50, o sea, cerca de siete veces más que el propio azúcar [Inovação Unicamp (2008)]. Debemos recordar la gran integración entre la agroindustria de la caña y la producción de alimentos proporcionada por estas industrias.

Podemos concluir que, los nuevos productos exigen inversiones menores a las que son necesarias en una planta de bioetanol. Probablemente, el mayor reto para lograr una adecuada promoción y difusión de estos procesos sea el dominio de las tecnologías involucradas, que presuponen la aplicación del conocimiento de la biotecnología moderna y de todo el aparato de instrumentación y control que ésta comprende.



Capítulo 5

Tecnologías avanzadas en la agroindustria de la caña de azúcar

La diversidad de productos que se pueden obtener de la caña de azúcar no se agota con los destacados en el capítulo anterior. A continuación, se presentan las tecnologías innovadoras para la utilización de la caña como insumo industrial y energético, involucrando la producción de bioetanol y considerando los procesos dirigidos a la valorización de los materiales lignocelulósicos, mediante su hidrólisis o gasificación, y la producción de plásticos biodegradables, basados esencialmente en los estudios de Seabra (2008). Se incluye también en este capítulo una revisión de las oportunidades de empleo del bioetanol como insumo básico para la industria petroquímica (o alcoholquímica), campo en el cual ya se desarrollaron proyectos importantes hace algunas décadas y que ahora se retoman con nuevas iniciativas.

A medida que toda la caña, con sus azúcares y fibras, pasa a ser una fuente de materiales de interés, utilizable en una amplia gama de productos en procesos integrados e interdependientes, las plantas de azúcar y bioetanol se configuran cada vez más en el modelo de las llamadas biorrefinerías, que imitan a las actuales refinerías de la industria del petróleo, pero con nuevas bases, renovables y ambientalmente más saludables.

5.1 Hidrólisis de residuos lignocelulósicos

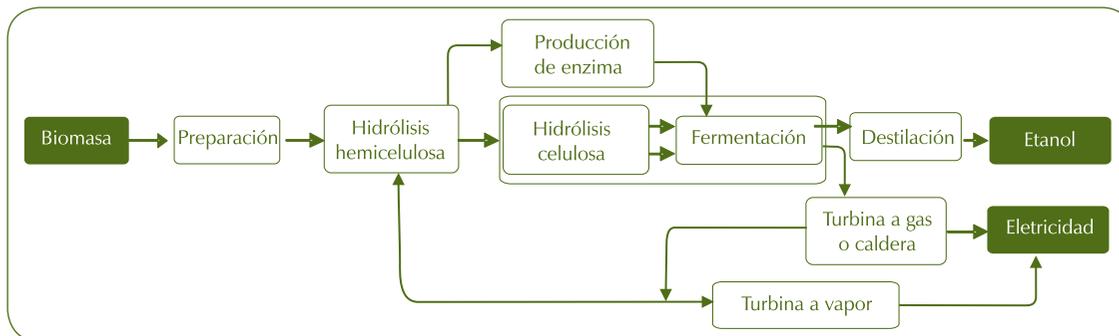
Como se planteó en el Capítulo 3, con excepción de la caña, las tecnologías disponibles comercialmente en la actualidad para la producción de bioetanol por medio del almidón y de azúcares, como en el caso del maíz y de la remolacha, dan por resultado ganancias energéticas y ambientales bastante reducidas. Por otro lado, estas materias primas presentan una ventaja económica limitada y encuentran, en general, mercados alternativos más remuneradores, como alimentos o insumos para otros fines. Sin embargo, a pesar de sus destacadas ventajas, la caña de azúcar no es una opción viable en todas las regiones del planeta. Principalmente por este motivo, los países del Hemisferio Norte están buscando incesantemente medios tecnológicos que permitan la producción de un biocombustible eficiente, tanto desde el punto de vista ambiental como desde el punto de vista económico. En la actualidad, predomina la idea de que en un futuro próximo, de entre cinco y diez años, la tecnología de producción del bioetanol por medio de la hidrólisis de materiales celulósicos podría ser una alternativa viable. No obstante, existen grandes obstáculos que superar y es difícil predecir con certeza el tiempo que tomará efectivamente este desarrollo.

El bioetanol viene siendo producido por la hidrólisis y fermentación de materiales lignocelulósicos desde finales del siglo XIX, pero solamente en los últimos veinte años esta tecnología ha sido propuesta para atender el mercado de combustibles. Los principales programas de investigación y desarrollo se llevan a cabo en los Estados Unidos y en Europa, básicamente en escalas experimentales de producción, pero su éxito podría transformar al bioetanol en un biocombustible factible de ser producido en casi todas las regiones del mundo, aprovechando la alta disponibilidad de residuos orgánicos de diversas fuentes [Macedo (2005)]. Prácticamente todos los residuos de biomasa producidos en las actividades agrícolas e industriales, e incluso los residuos urbanos, presentan elevadas concentraciones de materiales lignocelulósicos aprovechables mediante estas nuevas tecnologías.

Las tecnologías para la obtención del bioetanol a base de materiales lignocelulósicos comprenden la hidrólisis de los polisacáridos de la biomasa en azúcares fermentables y su posterior fermentación para la producción del bioetanol. Para ejecutar esta tarea, la hidrólisis utiliza tecnologías complejas y multifásicas, en base al uso de vías ácidas y/o enzimáticas para la separación de los azúcares y la remoción de la lignina. Una configuración genérica y simplificada del proceso se presenta en la Figura 19.

A diferencia de los procesos termoquímicos, la composición y la estructura de la biomasa tienen fuerte influencia en la naturaleza y en los rendimientos de los procesos de hidrólisis y fermentación. En realidad, mucho esfuerzo de investigación deberá estar concentrado con exclusividad en la mejor comprensión de la formación de los componentes de la estructura vegetal, y en cómo sería posible modificarla para aumentar los rendimientos del proceso de hidrólisis [DOE (2006)], ya que la hidrólisis sólo es eficiente, de hecho, tras alguna separación de las fracciones de la biomasa.

Figura 19 – Esquema del proceso de producción de etanol por medio de la hidrólisis de la biomasa



Fuente: Seabra (2008).

La biomasa lignocelulósica está compuesta por polisacáridos (celulosa y hemicelulosa) y por la lignina, polímero complejo de grupos metoxi y fenilpropánicos, que mantiene a las células unidas. La fracción celulósica (40%-60% de la materia seca) es un polímero lineal del dímero glucosa-glucosa (celobiosa), rígido y difícil de romper; su hidrólisis genera glucosa, un azúcar de seis carbonos, cuya fermentación con *Saccharomyces cerevisiae* ya es bien conocida. A su vez, la fracción hemicelulósica (20%-40%), en general, está constituida por una cadena principal de xilosa (enlaces β -1,4) con varias ramificaciones de manosa, arabinosa, galactosa, ácido glucurónico, etc. La hemicelulosa es mucho más fácil de hidrolizar que la celulosa, pero la fermentación de los azúcares de cinco carbonos (pentosas) todavía no está tan desarrollada como los procesos que involucran a la glucosa. La estructura bioquímica de la fracción de lignina (10%-25%) no está relacionada con moléculas simples de azúcar, razón por la cual no se la busca para la producción de bioetanol por vías fermentativas. Esta fracción, sin embargo, desempeña un rol fundamental para el éxito de la tecnología de hidrólisis. A pesar de ser posible producir diversos productos en base a la lignina, en la actualidad el foco de los estudios se dirige al uso de este material como fuente de energía para los procesos, lo que aseguraría la autosuficiencia y, eventualmente, incluso la posibilidad de exportar alguna energía eléctrica excedente. Por supuesto, esta situación es positiva tanto para la viabilidad económica de la tecnología como en relación a los aspectos ambientales, ya que reduciría la dependencia de recursos energéticos fósiles externos.

En general, la primera etapa del proceso consiste en el pretratamiento mecánico de la materia prima, que busca la limpieza y la “ruptura” del material, con el objetivo de causar la destrucción de su estructura celular o hacerla más accesible a los tratamientos químicos o biológicos posteriores. La etapa siguiente consiste en la remoción de la lignina y en la hidrólisis de la hemicelulosa, que también puede ser denominada pretratamiento. Para esta etapa hay diversos tipos de procesos, con diferentes rendimientos y efectos distintos sobre la biomasa y consecuente impacto en las etapas que siguen. En la Tabla 20 se presentan los métodos más utilizados.

Tabla 20 – Procesos para el pretratamiento de la biomasa para hidrólisis

Proceso	Descripción	Tiempo de reacción	Rendimiento de xilosa	Costo*
Físicos				
Explosión de vapor	La biomasa triturada se trata con vapor (saturado, 160°-260° C) seguido de una rápida descompresión	1-10 min	45%-65%	–
Termohidrólisis	Utiliza agua caliente a alta presión (presiones superiores al punto de saturación) para hidrolizar la hemicelulosa	30 min	88%-98%	–
Químicos				
Hidrólisis ácida	Mediante el uso de ácidos sulfúrico, clorhídrico, o nítrico, concentrados o diluidos	2-10 min	75%-90%	+
Hidrólisis alcalina	Mediante el uso de bases, como hidróxidos de sodio o calcio	2 min	60%-75%	++
Organosolv	Una mezcla de un solvente orgánico (metanol, bioetanol y acetona, por ejemplo) con un catalizador ácido (H ₂ SO ₄ , HCl) se usa para romper los enlaces internos de la lignina y de la hemicelulosa	40-60 min	70%-80%	
Biológicos	Utilización de hongos para solubilizar la lignina. Generalmente, se lo utiliza en combinación con otros procesos			
Combinados				
Explosión de vapor catalizada	La adición de H ₂ SO ₄ (o SO ₄) o CO ₂ en la explosión de vapor puede aumentar la eficiencia de la hidrólisis enzimática, disminuir la producción de compuestos inhibidores y promover una remoción más completa de la hemicelulosa	1-4 min	88%	–
Afex (<i>ammonia fiber explosion</i>)	Exposición al amonio líquido a alta temperatura y presión por un cierto período de tiempo, seguida de una rápida descompresión		50%-90%	
Explosión de CO ₂	Similar a la explosión de vapor		75%	

Fuente: Elaborado en base a Hamelinck et al. (2005).

* El signo + indica efecto ventajoso (menor costo).

En la etapa de hidrólisis propiamente dicha, la celulosa se convierte en glucosa, según la siguiente reacción, que puede catalizarse por ácido diluido, ácido concentrado o enzimas (celulasa):



La hidrólisis ácida (tanto concentrada como diluida) ocurre en dos etapas, para aprovechar las diferencias entre la hemicelulosa y la celulosa. La primera implica, esencialmente, la hidrólisis de la hemicelulosa, conducida de acuerdo con las condiciones del pretratamiento discutidas con anterioridad. En la segunda etapa se aplican temperaturas más altas, buscando optimizar la hidrólisis de la fracción celulósica [Dipardo (2000)]. El proceso con ácido diluido utiliza altas temperaturas y presiones, con tiempos de reacción de segundos a algunos minutos, lo que facilita el uso de procesos continuos. Por su parte, los procesos con ácido concentrado se desarrollan en condiciones más amenas, pero con tiempos de reacción típicamente más largos [Graf y Koehler (2000)]. La Tabla 21 presenta una comparación entre los diferentes procesos de hidrólisis.

Tabla 21 – Comparación de las diferentes opciones para la hidrólisis de la celulosa

Proceso	Insumo	Temperatura	Tiempo	Sacarificación
Ácido diluido	< 1% H ₂ SO ₄	215° C	3 min	50%-70%
Ácido concentrado	30%-70% H ₂ SO ₄	40° C	2-6 h	90%
Enzimático	Celulasa	70° C	1,5 día	75%-95%

Fuente: Elaborado en base a Hamelinck et al. (2005).

En el proceso enzimático, la hidrólisis se cataliza por enzimas llamadas de modo genérico celulasas. En realidad, se trata de un complejo enzimático compuesto por endoglucanasas (que atacan a las cadenas de celulosa para producir polisacáridos de menor longitud), exoglucanasas (que atacan a las terminales no reductoras de estas cadenas más cortas y retiran la celobiosa) y β-glucosidasas (que hidrolizan a la celobiosa y otros oligómeros a la glucosa) [Philippidis y Smith (1995)]. Al igual que en los procesos ácidos, se necesita un pretratamiento para exponer la celulosa al ataque de las enzimas.

Como el proceso enzimático se desarrolla en condiciones amenas (pH 4,8 y temperatura entre 45° y 50° C), el costo de procesamiento de los insumos es relativamente bajo [Sun y Cheng (2002)], además de permitir mayores rendimientos, posibilitar la fermentación simultánea a la sacarificación (proceso SSF – *simultaneous saccharification and fermentation*) y presentar bajo costo de mantenimiento (no hay problema de corrosión). Debido a su gran potencial de evolución y reducción de costos, muchos especialistas ven en la hidrólisis enzimática a la clave para la producción de bioetanol a un costo competitivo en el largo plazo [Dipardo (2000) y Lynd et al. (1996)].

La hidrólisis con ácido diluido se encuentra, en comparación, en una etapa más avanzada que las demás, pero con graves limitaciones de rendimiento (50%-70%). La hidrólisis con ácido concentrado presenta rendimientos mayores y menores problemas con la producción de inhibidores, aunque la necesidad de recuperación del ácido y de equipos resistentes a la corrosión comprometa el desempeño económico del proceso. La hidrólisis enzimática, por su lado, presenta altos rendimientos (75%-85%), y se esperan grandes mejoras todavía (85%-95%). Además, la no utilización de ácidos puede representar grandes ventajas, no sólo económicas (equipos con materiales más baratos y menor costo operacional) sino también ambientales (no hay producción de residuos). Es importante observar que, en la mayoría de los casos, estos procesos están todavía en fases iniciales de desarrollo, con experimentos conducidos en volúmenes relativamente reducidos. Para los sistemas reales, con grandes volúmenes, tales rendimientos deberán ser naturalmente menores.

Con independencia del método, la fermentación de los azúcares del hidrolizado a bioetanol sigue, básicamente, los mismos principios observados para el caso de la producción en base al almidón o a los azúcares. No obstante, en el caso de la hidrólisis, gran parte del hidrolizado se compone por azúcares de cinco carbonos, los cuales no pueden ser fermentados por clases salvajes de *S. cerevisiae*. Hasta el momento, la mayoría de los procesos descartan esta fracción de los azúcares o realizan la fermentación en dos etapas, comprometiendo bastante su viabilidad económica.

Para el futuro, la tendencia es a que estas transformaciones puedan suceder en forma simultánea en un menor número de reactores, necesitando, entonces, microorganismos capaces de fermentar ambos azúcares con alto rendimiento. Para ello, los investigadores han recurrido a la ingeniería genética para adicionar vías metabólicas de pentosa en levaduras y otros microorganismos bioetanológicos y además mejorar el rendimiento de los microorganismos que ya presentan capacidad de fermentar a ambos azúcares. A pesar de que se haya logrado éxito en este sentido, la fermentación de mezclas de los azúcares de la biomasa todavía no alcanzó un nivel comercialmente viable [Galbe y Zacchi (2002), Lynd et al. (2005) y Gray et al. (2006)]. Además, hay que considerar los inhibidores nocivos a la fermentación presentes en el hidrolizado (ácidos, furanos, compuestos fenólicos etc.), los cuales deben ser removidos en caso de alta concentración, o requieren la utilización de estirpes robustas de microorganismos resistentes.

Para el caso de la hidrólisis enzimática, hoy se considera que el proceso con sacarificación y fermentación simultáneas (SSF) es una opción "posible" (a pesar de no estar todavía optimizada), que reduciría substancialmente los problemas de inhibición. Una evolución de este proceso es la inclusión de la cofermentación de substratos con múltiples azúcares, la cual permite el consumo de pentosas y hexosas en el mismo reactor. Pero, en la actualidad, esta configuración (SSCF – *simultaneous saccharification and co-fermentation*) todavía se está probando a escala piloto y debe ser el foco de desarrollo a mediano plazo. El objetivo de la evolución de la tecnología parece ser el establecimiento del bioproceso consolidado (CBP – *consolidated bioprocessing*), en el cual las cuatro transformaciones biológicas involucra-

das en la producción del bioetanol (producción de enzimas, sacarificación, fermentación de hexosas y fermentación de pentosas) ocurren en una única etapa. En este caso, microorganismos termofílicos producirían de manera anaeróbica complejos enzimáticos con mejor actividad celulolítica —comparado con las típicas enzimas de hongos— y fermentarían todos los azúcares liberados en el mismo reactor [Wyman (2007)].

Teniendo en cuenta todas estas posibilidades, se espera a lo largo del tiempo algún aumento de rendimiento del bioetanol, pero, principalmente, la reducción de los costos de producción. En un amplio trabajo prospectivo realizado recientemente [Hamelinck et al. (2005)], se estimó que, en el corto plazo, la hidrólisis enzimática con pretratamiento con ácido diluido estaría en un nivel comercial. En este caso, el proceso podría recuperar cerca de un 35% de la energía de la biomasa en la forma de bioetanol y un total del 38% incluyendo la electricidad excedente. El costo del bioetanol sería de 22 €/GJ, considerando un costo de biomasa de 3 €/GJ e inversión de 2100 €/kW de bioetanol (valores de 2003). Y para el largo plazo, en base a una posible configuración del proceso CBP, la recuperación de energía como bioetanol podría alcanzar al 47%, totalizando 52% en conjunto con la electricidad excedente. Pero la principal ventaja esperada es la enorme reducción del costo del bioetanol, que podría llegar a 9 €/GJ, tomando en cuenta que el costo de la biomasa pueda ser reducido a 2 €/GJ y la necesidad de inversión a 900 €/kW de bioetanol. Para estos valores, la energía considerada siempre se refiere al poder calorífico superior (PCS).

La Tabla 22 resume los principales resultados de estudios recientes sobre procesos en desarrollo para la producción de bioetanol por hidrólisis; pero se debe observar que las previsiones de disponibilidad presentadas en la última columna se efectuaron, naturalmente, en la época de los estudios comentados. En esta tabla, los rendimientos se refieren a la producción de bioetanol por tonelada de biomasa seca. El costo de la biomasa, que se presenta en la misma tabla, informa el valor adoptado para el cálculo del costo del bioetanol, el cual se define en forma exógena al proceso productivo.

Con independencia de la vía tecnológica, es importante notar el enorme peso que tiene el costo de la biomasa sobre el costo final del bioetanol. Por lo general, en las estimaciones realizadas para los países del Hemisferio Norte, el costo de la biomasa representa cerca de un 40% del costo del bioetanol, y gran parte de las reducciones del costo del biocombustible en el futuro se basan en la reducción del valor de la biomasa. Es evidente que esto crea grandes expectativas cuando se considera el caso de otras regiones del planeta, para las cuales existen opciones de biomasa con costos mucho más bajos. Un ejemplo es la biomasa de la caña en Brasil, cuya paja presenta un costo inicialmente evaluado en cerca de 1 US\$/GJ [Hassuani et al. (2005)], mientras que el bagazo tiene costo cero. Es claro que, si se consideran sus usos alternativos, el bagazo puede ser bien valorado en la producción de energía eléctrica, como se comentara en el capítulo anterior.

Tabla 22 – Comparación de las estimaciones de rendimientos y costos para la producción de bioetanol por medio de la hidrólisis

Referencia	Proceso	Rendimiento (litro/t)	Costo de la biomasa	Costo del etanol	Disponibilidad
Hamelinck et al. (2005)	SSF con pretratamiento con ácido diluido	~300	3 €/GJ	0,98 €/litro	Corto plazo
	SSCF con pretratamiento con explosión de vapor	~340	2,5 €/GJ	0,58 €/litro	Mediano plazo
	CBP con termohidrólisis	~400	2 €/GJ	0,39 €/litro	Largo plazo
Aden et al. (2002)	SSCF con pretratamiento con ácido diluido	374	33 US\$/t	0,28 US\$/litro (mínimo precio)	Corto plazo
Wooley et al. (1999)	SSCF con pretratamiento con ácido diluido	283	44 US\$/t	0,38 US\$/litro	Corto plazo
	Idem	413	28 US\$/t	0,20 US\$/litro	Largo plazo

Fuente: Seabra (2008).

En Brasil, la tecnología de hidrólisis también viene siendo desarrollada, con investigaciones aplicadas en un nivel razonablemente avanzado. Desde hace algunos años, en un proyecto que involucra a la Fundación de Apoyo a la Investigación del Estado de São Paulo (Fapesp) y al Centro de Tecnología de Caña (CTC), Dedini Industrias de Base viene probando en escala piloto un proceso para la producción de bioetanol a base de bagazo y, eventualmente, de paja de caña, por medio de un tratamiento Organosolv combinado con la hidrólisis con ácido diluido. En el marco de este proyecto, está en operación una unidad con capacidad diaria de 5 mil litros de bioetanol, instalada en una planta de azúcar y bioetanol, que busca la determinación de parámetros de ingeniería de procesos para el dimensionamiento de unidades de mayor tamaño [Dedini (2008)].

En este proceso, patentado como DHR (Dedini Hidrólisis Rápida), el solvente (etanol) destruttura la matriz celulosa-hemicelulosa-lignina, disolviendo la lignina, hidrolizando la hemicelulosa y exponiendo la celulosa a la acción del ácido sulfúrico diluido, que promueve rápidamente (10 a 15 minutos) la hidrólisis de esta fracción, bajo temperaturas de 170° a

190° C y presiones del orden de 25 bar. Se trata de un proceso continuo, que viene operando desde 2003 de modo uniforme y estable. Aunque todavía haya puntos a perfeccionar, ya se superaron retos complejos, como la alimentación continua de bagazo en reactores bajo presión elevada y la selección de materiales compatibles con las altas sollicitaciones mecánicas en ambientes muy corrosivos. Como en este proceso la fracción de las pentosas no es aprovechada, los rendimientos son relativamente bajos, del orden de los 218 litros de bioetanol por tonelada de bagazo seco; pero en el futuro se espera alcanzar niveles próximos a los 360 litros por tonelada de bagazo, en la medida en que esta fracción de azúcares sea utilizada [Rossell y Olivério (2004)].



Planta-piloto de Dedini para la producción de etanol en base al bagazo.

En fecha más reciente, Petrobrás tomó la iniciativa de instalar en el Cenpes, su Centro de Investigaciones en Río de Janeiro, un reactor para hidrólisis enzimática; y por iniciativa del Ministerio de Ciencia y Tecnología, se está implementando otra plataforma para hidrólisis enzimática de bagazo de caña en escala piloto en Campinas (SP), junto al recién creado Centro de Ciencia y Tecnología del Bioetanol. Esta plataforma le da continuidad a un proyecto en escala de laboratorio, que involucra a 20 unidades de investigación en Brasil con asociaciones en el exterior y una centena de investigadores de universidades y centros de investigación brasileños.

En términos generales, se puede decir que ya se ha alcanzado mucho en el desarrollo de la tecnología de hidrólisis, pero todavía quedan importantes retos a enfrentar para la efectiva

implementación de unidades comerciales y competitivas por medio de este proceso. Como los recursos disponibles son limitados, es esencial evaluar cuáles son los ítems realmente vitales para la consolidación de la tecnología. En este sentido, en los últimos años se desarrollaron clases de microorganismos adaptados, y se modelaron y optimizaron las principales operaciones involucradas en el proceso, pero todavía, básicamente, en la escala reducida de los reactores experimentales, en que los controles de temperatura y las condiciones de asepsia son más fáciles. A pesar de no haber consenso sobre cuál sería la mejor opción tecnológica para la producción del bioetanol por estas vías innovadoras, en todo el mundo los investigadores claman por la construcción de las primeras plantas comerciales, que permitirían la obtención de las tan esperadas ganancias por el aprendizaje [Lynd et al. (2005), Zacchi (2007) y Wyman (2007)].

5.2 Gasificación para la producción de combustibles y electricidad

La gasificación es un proceso de conversión termoquímica de la biomasa, realizado a elevadas temperaturas, mediante el cual las sustancias orgánicas (sólidas o líquidas) son convertidas en productos gaseosos, principalmente CO, H₂, CO₂ y vapor de agua, observándose también la formación de hidrocarburos leves y otros compuestos volátiles y condensables como productos secundarios [Grabowski (2004)]. Los constituyentes inorgánicos de la biomasa se descargan en forma de cenizas. El proceso se puede llevar a cabo mediante la reacción del material orgánico con el oxígeno del aire o del vapor, o aun con oxígeno puro, pudiendo utilizarse reactores a presión atmosférica o presurizados. El calentamiento del gasificador se puede realizar de manera directa, por la oxidación parcial de la biomasa, o indirecta, por medio de mecanismos de intercambio de calor. En cuanto al proyecto de reactor, se pueden utilizar gasificadores de lecho fijo, fluidizado o arrastrado. Como se puede observar, la gasificación presenta vías bastante diversificadas, las cuales se deben elegir en función de la biomasa a ser procesada, el tipo de producto buscado y la escala de la unidad.

Las reacciones que ocurren en un gasificador son bastante complejas y de su desarrollo adecuado depende la eficiencia del proceso. Para dar una noción sencilla del proceso de gasificación, tras la volatilización del combustible sólido ocurren simultáneamente las siguientes reacciones [Rauch (2002)]:



A través de la gasificación es posible transformar a un material heterogéneo, como es el caso de la biomasa, en un combustible gaseoso apropiado para diversas aplicaciones. No obstante, para algunos empleos este gas necesita ser debidamente limpiado para adecuarlo a los estándares exigidos para su aplicación en el uso final. La limpieza puede ocurrir a baja tem-

peratura; por ejemplo, por medio de filtración (que ocurre a alrededor de 200° C) y lavado, para la remoción de particulados y condensables, después de una refrigeración previa. La limpieza también se puede realizar a media-alta temperatura (350°–400° C), para su utilización en turbinas a gas y células a combustible. En general, esta limpieza en caliente se realiza mediante el empleo de filtros cerámicos [Macedo et al. (2006)].

La gasificación de la biomasa se viene desarrollando desde la década de 1940, habiéndose desarrollado diferentes tipos de gasificadores, de arreglos del proceso y de aplicaciones. Como productos, existen desde pequeños sistemas para el suministro de gas a motores de automóviles de combustión interna, hasta pequeñas aplicaciones estacionarias de producción combinada de calor y potencia (CHP). Además, también se ha buscado desarrollar sistemas de mayor escala para la generación de potencia con turbinas a gas, de entre 10 MW y 100 MW térmicos, y, más recientemente, sistemas que generan gas limpio para la síntesis de combustibles líquidos (metanol, líquidos por Fischer-Tropsch, bioetanol, DME, etc.).

En el marco de esta tecnología, muchas de las necesidades de desarrollo ya fueron identificadas y parcialmente ecuacionadas en la década de 1990, tales como la adecuación de la alimentación de biomasa “suelta” en gran escala en reactores presurizados, el desarrollo de sistemas de limpieza del gas para satisfacer la calidad requerida, y otras necesidades específicas relacionadas con los procesos posteriores de utilización del gas producido, como en turbinas a gas para gases de bajo poder calorífico y en reactores de síntesis para el gas de biomasa, utilizados para la producción de líquidos. La síntesis de combustibles puede verse beneficiada por la experiencia de la industria de combustibles fósiles, pero la mayor complejidad del proceso asociado demanda todavía más desarrollo.

La perspectiva es que la gasificación de la biomasa pueda viabilizar tanto la producción de bio-combustibles líquidos, principalmente para usos en automóviles, como la generación de bioelectricidad en gran escala, como se presenta en los próximos párrafos. El principal factor que impulsa este desarrollo tecnológico es, evidentemente, la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y de sustituir el consumo de derivados del petróleo. Pese a la experiencia previa con algunas plantas de demostración, los esfuerzos de investigación y desarrollo no han sido constantes a lo largo de los años, y por ello se espera que estas tecnologías se conviertan en opciones comercialmente maduras tan sólo a mediano y largo plazo (en más de diez años). Pero, para que eso de hecho ocurra, todavía se necesita mucho empeño en el campo de la investigación y del desarrollo, así como la definición y la implementación de políticas de fomento adecuadas.

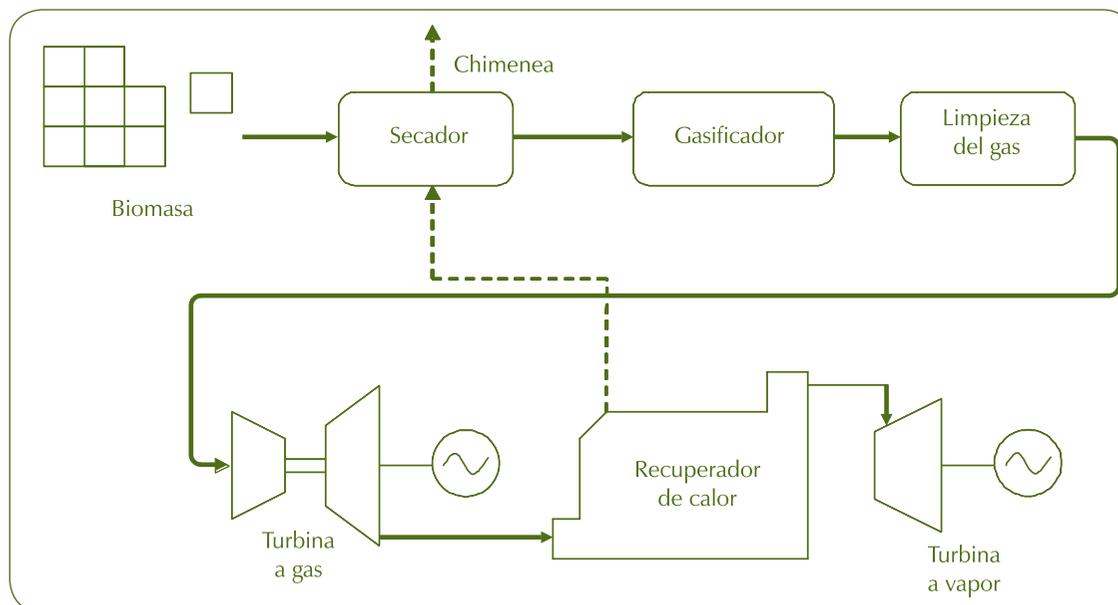
Gasificación de la biomasa integrada a ciclos combinados (tecnología BIG/GT-CC)

La gasificación se considera una tecnología crucial para facilitar la conversión eficiente, limpia y de bajo costo de la biomasa en bioelectricidad. Esta tecnología permite implementar el uso de biomasa en las turbinas a gas, en cuyo ciclo térmico de potencia los fluidos de trabajo operan a temperaturas medias mucho más elevadas (superior a 1.200° C) que en los ciclos

convencionales a vapor (inferior a 600° C), lo que reduce las pérdidas termodinámicas y maximiza el desempeño. En este sentido, se espera que la tecnología de gasificación de la biomasa, integrada a ciclos combinados de turbinas a gas / turbinas a vapor (*biomass integrated gasification/gas turbine combined cycle* – BIG/GT-CC) sea viable y abra un amplio campo para la aplicación de la biomasa sólida en la generación de energía eléctrica. En el caso de los gasificadores, se deben limpiar menores volúmenes de gas, comparado con la combustión directa de la biomasa; y las turbinas a gas, asociadas a ciclos a vapor (ciclo combinado), ofrecen alta eficiencia en la generación eléctrica con bajos costos específicos de capital.

El concepto básico de la tecnología BIG/GT-CC involucra el pretratamiento de la biomasa, seguido por gasificación, refrigeración y limpieza del gas y su combustión en una turbina. A través de un recuperador de calor, los gases calientes que deja la turbina a gas generan vapor, el cual es utilizado en un ciclo a vapor para la generación de más electricidad. Por otro lado, después de utilizados para la producción de vapor, los gases de escape a baja temperatura todavía se pueden utilizar en el secado de la biomasa, haciendo completa la integración del sistema [Faaij et al. (1998)]. La Figura 20 muestra una representación esquemática básica para un sistema BIG/GT-CC.

Figura 20 – Representación esquemática de un sistema BIG/GT-CC



Fuente: Elaborado en base a Larson et al (2001).

Si se aplica el concepto básico de gasificar biomasa y emplear el gas en turbinas a gas, existen tres variantes que se pueden utilizar, cuyas principales diferencias están relacionadas con el diseño del gasificador. Una vertiente se basa en la tecnología de lecho fluidizado circulante

(*circulating fluidized bed* – CFB), con operación del gasificador a presión atmosférica y con inyección de aire para el suministro del oxígeno necesario para las reacciones de gasificación. Con una gran experiencia acumulada en la gasificación de biomasa según esta tecnología, la empresa sueca TPS – Termiska Processer AB propone, para los sistemas BIG/GT-CC, la inserción de un reactor inmediatamente después del gasificador, para el “cracking” del alquitrán, sustancia que trae dificultades a los sistemas de limpieza de los gases. La segunda variante se basa en un gasificador con calentamiento indirecto y que opera a presiones próximas a la atmosférica. En este caso, el proyecto de mayor relieve es el del Battelle Columbus Laboratory (BCL) de los Estados Unidos, en el cual se utiliza arena para viabilizar el calentamiento de la materia orgánica. La tercera variante involucra a la tecnología de gasificación en lecho fluidizado circulante, pero operando a altas presiones (20-30 bar, 900°-1.000° C). La empresa estadounidense Foster Wheeler y la finlandesa Carbona se destacan en esta tecnología [Consonni y Larson (1996) y Larson et al. (2001)].

En cuanto a los rendimientos, diversos estudios han sido publicados a largo de los años en una tentativa de estimar la eficiencia y los costos de la bioelectricidad, considerando que todos los problemas tecnológicos serían resueltos. Sin embargo, existen aún barreras importantes a ser superadas, entre ellas las siguientes: alimentación y operación de gasificadores presurizados de gran capacidad; limpieza del gas con “cracking” completo de alquitrán; separación de álcalis y particulados del gas producido; y modificación de las turbinas a gas para uso de gas con bajo poder calorífico, para obtener un desempeño equivalente a las turbinas con quema de gas natural; y significativa reducción del costo de capital por medio del aprendizaje. Se estima que la eficiencia para la generación de energía eléctrica deberá situarse en torno al 45%, para costos de energía eléctrica producida en el rango de 50 US\$/MWh a 60 US\$/MWh, como se muestra en la Tabla 23, dependiendo del costo de la biomasa y de la opción de gasificación utilizada [Jin et al. (2006)].

En los últimos 15 años ha habido un esfuerzo considerable de investigación y desarrollo en tecnologías de gasificación de la biomasa asociadas al uso de turbinas a gas. No obstante, a pesar de que varios proyectos fueron considerados en este período, sólo una instalación fue efectivamente construida y operó por un tiempo significativo, en Värnamo, Suecia, utilizando la tecnología de TPS. Uno de los proyectos, de hecho, debería haber sido viabilizado en Brasil, con la construcción de un sistema BIG/GT-CC de 30-32 MW de potencia eléctrica, en el interior del Estado de Bahía, utilizando madera de eucalipto como combustible, pero que no llegó a ser instalado. La alternativa más plausible, aunque aún bastante improbable, sería la utilización de sistemas BIG-CC integrados con plantas de azúcar y bioetanol, ya que el bajo costo de la biomasa favorecería la viabilidad del proceso. Esta alternativa ha sido investigada desde 1997, por el entonces Centro de Tecnología de Copersucar (hoy *Centro de Tecnologia Canavieira*), en asociación con TPS. Pero, por el momento, sólo existen especulaciones en cuanto a la posibilidad de la construcción de una unidad de demostración, en una futura continuación del proyecto [Hassuani et al. (2005)].

Tabla 23 – Comparación de las estimaciones de rendimiento y costos de los sistemas BIG/GT-CC

Referencia	Tecnología de gasificación	Eficiencia relativa al PCi	Inversión (US\$/kW)	Costo de la biomasa (US\$/GJ)	Costo de la energía eléctrica (US\$/MWh)
Jin et al. (2006)	Atmosférica con calentamiento indirecto	43,8%	968	3,0	55
	Presurizada con inyección de oxígeno	45%	1.059	3,0	52
Faaij et al.* (1998)	CFB presurizada	54%	1.950	4,0	80
Consonni y Larson (1996)	Atmosférica con calentamiento directo	41,9%	1.500	2,0	49

Fuente: Elaborado en base a Seabra (2008).

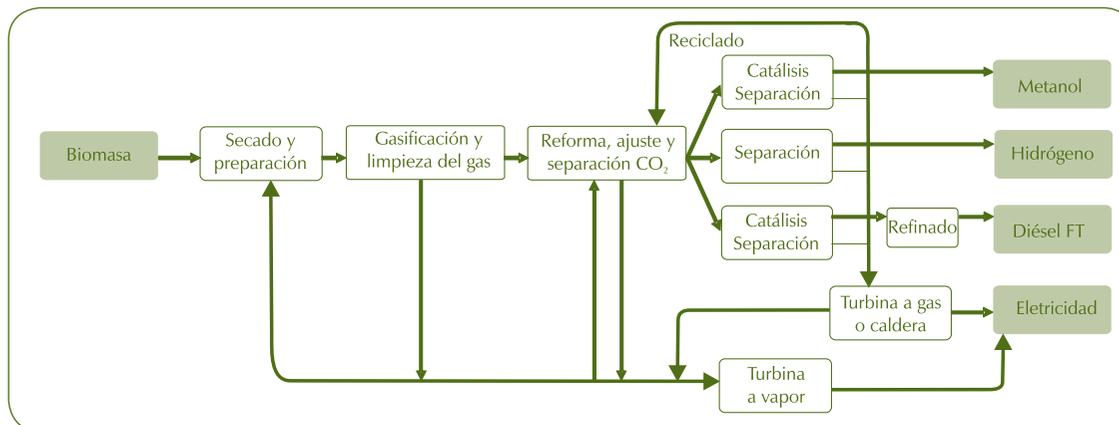
* Los valores originales en florines holandeses fueron convertidos al cambio de US\$ 1,00 = Dfl 2,00.

Síntesis de combustibles

Diversos biocombustibles, como los denominados líquidos Fischer-Tropsch (gasolina FT y diésel FT), hidrógeno, metanol, etanol y DME (dimetil éter), se pueden obtener a partir del gas de síntesis producido con biomasa. En este proceso, la gasificación de la biomasa da origen al gas de síntesis, el cual debe pasar por los procesos de limpieza, reforma y, si fuera necesario, ajuste de composición, para entonces ser transformado en combustible en un reactor propio. Como no todo el gas se convierte en combustible, existe la posibilidad de recircular esa parte no convertida (para la máxima producción de combustible) o, simplemente, quemarla para la producción de energía eléctrica (en un sistema BIG/GT-CC, por ejemplo). Esta última opción se conoce con el término *once-through* y se considera la más económica para los casos en que la electricidad pueda ser vendida [Hamelinck et al. (2001), Hamelinck et al. (2003) y Larson et al. (2005)]. La Figura 21 presenta un diagrama general para la producción de algunos combustibles.

En la producción de combustibles líquidos por esta tecnología, la escala de producción es un factor determinante de la economicidad del proceso. Por eso la tecnología de gasificación CFB presurizada es preferible, de acuerdo con algunos autores [Hamelinck et al. (2003), Larson et al. (2005), Hamelinck et al. (2001)]. La gasificación debe ocurrir de forma tal que el gas producido sea rico en CO e H₂, que son los principales reactivos para la producción de los combustibles líquidos. Debe evitarse la inyección de aire, puesto que no es deseable que el gas producido esté diluido en nitrógeno.

Figura 21 – Flujograma general para la producción de metanol, hidrógeno y diésel vía gasificación de biomasa (Fischer-Tropsch)



Fuente: Elaborado en base a Hamelinck et al.

Como el gas producido puede contener cantidades considerables de metano y otros hidrocarburos livianos, una opción es realizar la reforma, que consiste en la conversión de estos compuestos, a alta temperatura y en la presencia de un catalizador (por lo general, níquel), en CO e H₂. Otro punto importante es la relación H₂/CO, que debe ajustarse para cada tipo de biocombustible, con menos hidrógeno para los combustibles más pesados, como el diésel. Este ajuste se realiza por la reacción de cambio agua-gas, desarrollada en presencia de un catalizador a base de hierro [Van der Laan (1999)]:



Las reacciones básicas involucradas en la producción de cada combustible son las siguientes [Larson et al. (2005)]:



En cuanto a los reactores, existen tres concepciones básicas [Larson et al. (2005)]: lecho fijo (fase gaseosa), lecho fluidizado (fase gaseosa) y lecho de lodo (fase líquida). El primer concepto proporciona bajas conversiones con sólo un pasaje, y además es de difícil remoción de calor. El segundo posibilita conversiones mayores, pero presenta una operación más compleja, mientras que el último es el que presenta las más altas conversiones para procesos con pasaje simple.

Pensando en la situación actual de esta tecnología, se ha observado un desarrollo acentuado, sobre todo en Europa, con la construcción y la operación de proyectos de demostración e,

inclusive, de algunos comerciales. A partir de experiencias con gasificadores de biomasa y en la industria petrolera de síntesis, en los últimos años se han realizando análisis para evaluar las posibilidades y los costos de estos biocombustibles en el futuro. Para el caso de líquidos FT (gasolina y diésel), por ejemplo, se estima que si todos los problemas tecnológicos se resolvieran, las eficiencias globales podrían superar el 57%, considerando la producción combinada de combustibles (34% de eficiencia) y electricidad (23% de eficiencia). El costo del biocombustible sería de poco más de 15 US\$/GJ, para un costo de biomasa de 50 US\$/t e inversión poco superior a los 1.770 US\$/kW de combustible producido [Larson et al. (2006)]. Como ejemplo de comparación, el costo del diésel convencional es de cerca de 7 US\$/GJ, con el barril de petróleo a US\$ 30 [Macedo (2005b)]. La Tabla 24 presenta algunos valores de la literatura, con rendimientos y costos de biocombustibles líquidos producidos mediante procesos de síntesis asociados a gasificadores de biomasa.

Tabla 24 – Comparación de los rendimientos y costos para la producción de combustibles de síntesis

Referencia	Combustible	Rendimiento (litro/ton seca)	Inversión	Costo de la biomasa	Costo del combustible
Phillips et al. (2007)	Etanol	303	0,82 US\$/litro/año	35 US\$/t	0,26 US\$/litro
Larson et al. (2006)	Líquidos FT	138	1.774 US\$/kW _{comb, PCI}	50 US\$/t	15,3 US\$/GJ _{PCI}
	DME	468	1.274 US\$/kW _{comb, PCI}	50 US\$/t	13,8 US\$/GJ _{PCI}
Hamelinck et al. (2002)	Metanol	280-630	930-2.200 US\$/kW _{comb, PCS}	2 US\$/GJ	8,6-12,2 US\$/GJ _{PCS}

Fuente: Seabra (2008).

Como se ha comentado, la preocupación por las emisiones de GEI (Gases de Efecto Invernadero) y los costos del petróleo están fomentando las investigaciones sobre formas alternativas de producir combustibles líquidos a base de biomasa, con el menor uso posible de energía fósil e, incluso, secuestrando carbono emitido. Otra propuesta relativamente reciente [Williams et al. (2005)] es el uso de la gasificación de la biomasa en conjunto con el carbón, en un sistema “híbrido” en el cual la biomasa sería utilizada en un nivel suficiente para reducir de modo significativo las emisiones de GEI del ciclo térmico.

Los análisis para todos los sistemas bioenergéticos innovadores, utilizando gasificadores, mostraron que valorizar su potencial para mitigar el cambio climático es esencial para fomentar la viabilidad económica, asumiendo los precios del barril de petróleo a US\$ 30. Sin embargo, los elevados valores del petróleo observados en los últimos años, combinados con un esfuerzo mayor en el desarrollo y en la demostración de esta tecnología, pueden conducir a sistemas comerciales en menor tiempo.

Además de las vías de la hidrólisis y de la gasificación presentadas en los párrafos anteriores —razonablemente conocidas y con crecientes perspectivas de alcanzar la viabilidad económica a mediano plazo—, han surgido otras posibilidades que, una vez confirmada su factibilidad técnica en escalas comerciales de producción, también podrían abrir, a mediano plazo, nuevas fronteras para la utilización energética de la caña de azúcar. Entre las líneas aún en estudio se puede citar la producción de butano (C_4H_{10}), actualmente fabricado en plantas petroquímicas mediante vías bioquímicas, utilizando materiales lignocelulósicos como materia prima, para uso como aditivo para la gasolina, en concentraciones elevadas y afectando poco el consumo específico [DuPont (2008)]. Otra vía, sugerida recientemente, es la producción de biodiésel por medio de procesos bioquímicos que utilizan azúcares como sustrato [Amyris (2008)]. En este caso incluso se han presentado proyectos para implementar unidades industriales, los cuales involucran a la empresa poseedora de la tecnología y a empresas brasileñas. Por cierto, éstas son posibilidades interesantes y con un volumen significativo de tecnología aplicada aunque su viabilidad económica aún no esté demostrada, y se conozca poco acerca del desempeño de los procesos y de los costos fijos y variables involucrados.

5.3 Uso del bioetanol como insumo petroquímico o alcoholquímico

Con una amplia gama de tipos y aplicaciones, los materiales plásticos – término que designa, en forma genérica, a una diversificada familia de polímeros artificiales – tienen un papel fundamental en nuestra vida moderna, sea para sustituir a materiales tradicionales, como vidrio y madera, sea respondiendo a nuevos usos en el campo de los envases, materiales de revestimiento y materiales estructurales, entre tantas posibilidades. Para atender a este mercado, la industria petroquímica convencional utiliza esencialmente gas natural y nafta de petróleo como insumos. Luego, por medio de reacciones complejas, sintetiza sus productos en procesos que en forma usual se agrupan en tres categorías: a) las industrias de primera generación, que suministran los productos petroquímicos básicos, tales como eteno (o etileno, C_2H_4), propeno (o propileno, C_3H_6) y butadieno; b) las industrias de segunda generación, que transforman los petroquímicos básicos en los llamados petroquímicos finales, como polietileno (PE), polipropileno (PP), policloruro de vinilo (PVC), poliésteres y óxido de etileno; y c) y las industrias de tercera generación, en las cuales los productos finales son químicamente modificados o conformados en productos de consumo, tales como películas, recipientes y objetos.

El bioetanol es una sustancia homogénea y reactiva, que puede ser empleada con efectividad como insumo en diversos procesos tradicionalmente petroquímicos, que en este caso podrían ser denominados alcoholquímicos. Los principales procesos utilizados en la transformación del bioetanol pueden clasificarse de acuerdo con lo indicado en la Tabla 25, destacándose la producción de eteno como resultado de la deshidratación del bioetanol, precursor de una amplia gama de productos de segunda generación, como el polietileno (PE), el polipropileno (PP) y el policloruro de vinilo (PVC). En base a la ecuación de deshidratación del bioetanol y considerando una eficiencia de conversión del 95%, se tiene un consumo específico de 1,73 kg o 2,18 litros de bioetanol por kg de eteno.

En base a la deshidrogenación del bioetanol a acetaldehído, se obtienen otra clase de intermediarios de gran interés, butadieno y polibutadieno, componentes básicos de los cauchos sintéticos utilizados para diversas aplicaciones, incluso neumáticos. Prácticamente todos los productos listados en la Tabla 25 son de empleo difundido en los sectores industrial (pinturas, solventes y adhesivos), agrícola (fertilizantes y defensivos) y de uso final (por ejemplo, en fibras textiles). En efecto, el bioetanol se puede considerar una materia prima para la obtención de una amplia gama de productos tradicionalmente petroquímicos, a partir de su conversión mediante procesos de primera o de segunda generación.

Tabla 25 – Procesos básicos de la industria alcoholquímica

Processos	Principales productos	Aplicación típica
Deshidratación	Eteno Propeno Etilenglicol	Resinas plásticas Solventes Éter etílico Fibras textiles
Deshidrogenación Oxigenación	Acetaldehido	Ácido acético Acetatos Colorantes
Esterificación	Acetatos Acrilatos	Solventes Fibras textiles Adhesivos
Halogenación	Cloruro de etilo	Fluidos refrigerantes Productos medicinales Resinas plásticas
Amonólisis	Dietilamina Monoetilamina	Insecticidas Herbicidas
Deshidrogenación Deshidratación	Butadieno	Cauchos sintéticos

Fuente: Elaborado en base a Schuchardt (2001).

Los mercados para estos usos del bioetanol son significativos. Se estima que la demanda de bioetanol como insumo para la industria química y petroquímica brasileña puede alcanzar los 7 millones de metros cúbicos [Apla (2006)], cerca de un tercio de la producción observada en la cosecha 2006/2007. Como la producción de estos sectores en Brasil representa cerca del 3% de la producción mundial, es evidente que hay un gran potencial para la expansión del uso del bioetanol de caña de azúcar como materia prima en escala global. Considerando tan sólo la demanda mundial de etileno en 2005, de 105 millones de toneladas [CMAI (2005)], y una penetración del 10% de bioetanol en sustitución a otros insumos, se tiene un requerimiento de 23 mil millones de litros, del mismo orden de magnitud que la actual producción brasileña. El factor decisivo para el desarrollo de este mercado es el precio

Primeros pasos de la etanolquímica en Brasil

A principios de la década de los ochenta se condujeron con éxito proyectos que implementaban el uso del etanol como sustituto de las materias primas fósiles en la industria petroquímica brasileña, en las empresas Oxiteno y Coperbo – Companhia Pernambucana del Caucho (Companhia Pernambucana de Borrachas). Se estima que en ese período el consumo de bioetanol como materia prima fue de 500 millones de litros anuales [Pádua Rodrigues (2005)]. Estas vías productivas fueron descontinuadas a partir de 1985 a causa de la configuración desfavorable de precios, pero en la actualidad, considerando el elevado costo de insumos fósiles, vuelven a presentar interés. En el caso de Oxiteno, brazo petroquímico del Grupo Ultrapar, el bioetanol de caña se utilizó en forma regular como materia prima en su unidad de Camaçari, Bahía, en la primera mitad de los años 80, para una producción anual de etileno estimada en 230 mil toneladas. En la actualidad, esta empresa aplica recursos propios para el desarrollo de tecnología de procesos petroquímicos y alcoholquímicos, con diversas patentes internacionales registradas, en particular en la producción de catalizadores, componentes esenciales para la conversión del etanol en etileno y otros precursores. Además de ello, se ha movilizado para desarrollar la producción de etanol por hidrólisis de la celulosa e implementar biorrefinerías, reconociendo en forma explícita su interés en el suministro de materia prima para sus unidades de producción de etileno y etilenglicol [Inovação Unicamp (2006) e BNDES (2007)].

Coperbo tiene una historia más larga vinculando la producción de bioetanol y de insumos químicos. En septiembre de 1965, esta empresa puso en producción una unidad de butadieno en Cabo (PE), para fabricar 27,5 mil toneladas anuales de cauchos sintéticos a base de etanol, para atender a la creciente demanda de este elastómero, satisfecha sólo en forma parcial por la producción nacional de caucho natural. No obstante, con la liberación de la exportación de melaza y la importación de caucho natural por el gobierno de la época, faltó etanol para la producción de caucho, generando dificultades para la operación de la empresa. En 1971, el control accionario de Coperbo fue transferido a Petroquisa, lo que mejoró su condición financiera y le dio un nuevo impulso, favorecido por el aumento de la producción de etanol a partir de 1975. Se incluían en la línea de productos el ácido acético y el acetato de vinilo, componentes que terminaron justificando la creación de la Companhia Alcoholquímica Nacional (Companhia Alcooquímica Nacional), posteriormente controlada por Union Carbide, empresa actualmente bajo el control de Dow Chemical [Jornal do Comercio (1999)]. No se obtuvieron más detalles sobre su actual proceso industrial, pero es un hecho que esta empresa, durante algunos años, produjo butadieno, utilizado principalmente en la fabricación de neumáticos, en escala comercial, a base de etanol.

relativo del bioetanol frente a los demás insumos, ya que las tecnologías básicas están esencialmente dominadas.

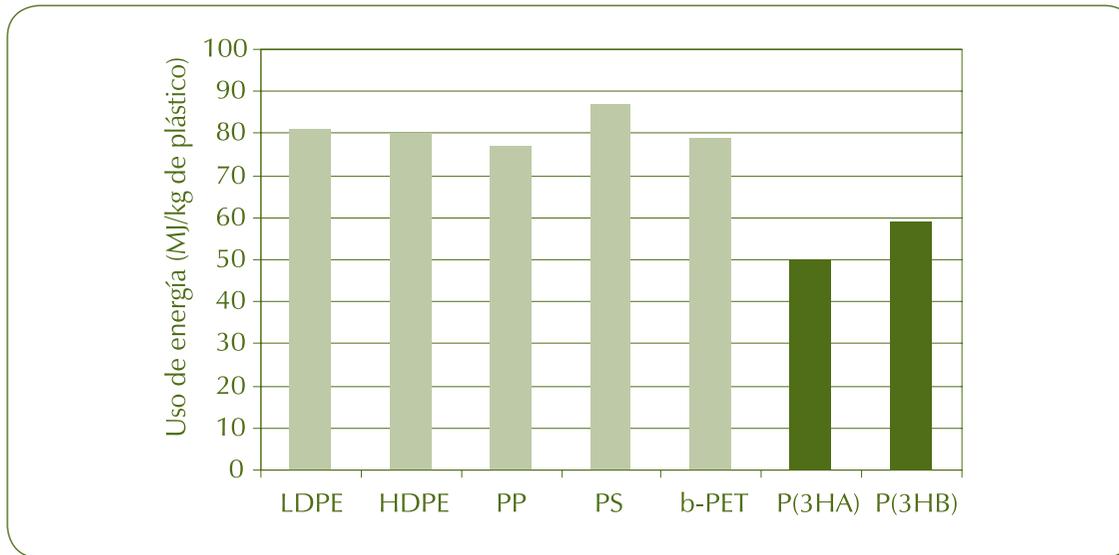
5.4 Producción de plásticos biodegradables

En 2004, la producción mundial de plásticos fue de 230 millones de toneladas y se espera que para 2010 este número se incremente a casi 300 millones de toneladas [Dröscher (2006)]. Pero este enorme mercado en crecimiento ha despertado gran preocupación ambiental, ya que el rápido descarte y la difícil degradación por el ambiente han promovido el crecimiento acelerado de los residuos. Después de usados, menos del 10% de los plásticos son reciclados, y la gran mayoría acaba en rellenos sanitarios [Waste-online (2008)], lo que termina exigiendo de la naturaleza cerca de 100 a 500 años para su completa degradación.

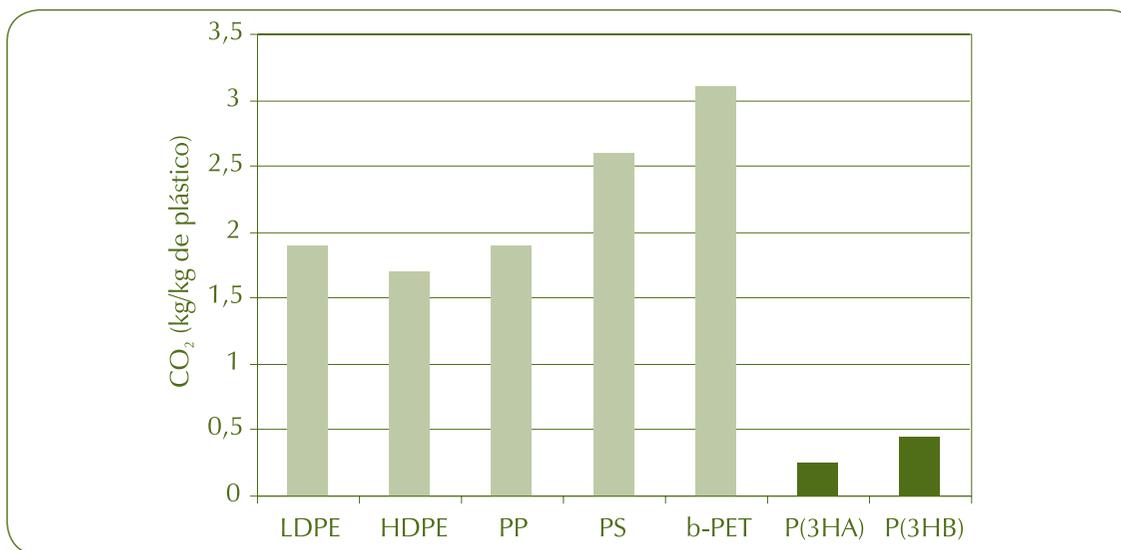
Además del aumento del reciclaje, otra opción eficaz para soslayar este problema es la utilización de los plásticos biodegradables. Los plásticos biodegradables son polímeros que, en condiciones apropiadas del medio ambiente, se degradan por completo por la acción microbiana en un corto espacio de tiempo. En el caso de los bioplásticos, presentan además la importante ventaja de ser el producto de fuentes renovables, como almidón, azúcares o ácidos grasos. Un ejemplo de bioplásticos es el ácido poliláctico (PLA), que está compuesto por monómeros de ácido láctico, obtenidos por fermentación microbiana. Otra posibilidad es obtener los biopolímeros directamente de los microorganismos, como en los casos del PHB (polihidroxibutirato), PHA (polihidroxialcanoatos) y de sus derivados; en estos casos, el biopolímero se biosintetiza como material de reserva energética de microorganismos.

El primer relato de la observación de los bioplásticos se realizó en la década de los veinte, pero el asunto permaneció adormecido hasta mediados de los setenta, cuando las crisis del petróleo estimularon la investigación de fuentes alternativas de materiales y de energía. En la actualidad, ya se conocen tanto las estructuras como las vías biosintéticas y las aplicaciones de muchos bioplásticos, pero todavía existen importantes limitaciones para la producción en gran escala, como las condiciones especiales de crecimiento requeridas para la síntesis de estos compuestos, la dificultad de sintetizarlos por medio de precursores de bajo costo y los altos costos de su recuperación. Aún con el uso de microorganismos recombinantes capaces de fermentar fuentes de carbono de bajo costo (p. ej. melaza, sacarosa, aceites vegetales y metano), estos procesos todavía no son competitivos con la producción convencional de los plásticos sintéticos [Luengo et al. (2003)].

Gráfico 15 – Uso de energía (a) y emisiones de GEI (Gases de Efecto Invernadero) (b) para la producción de plásticos



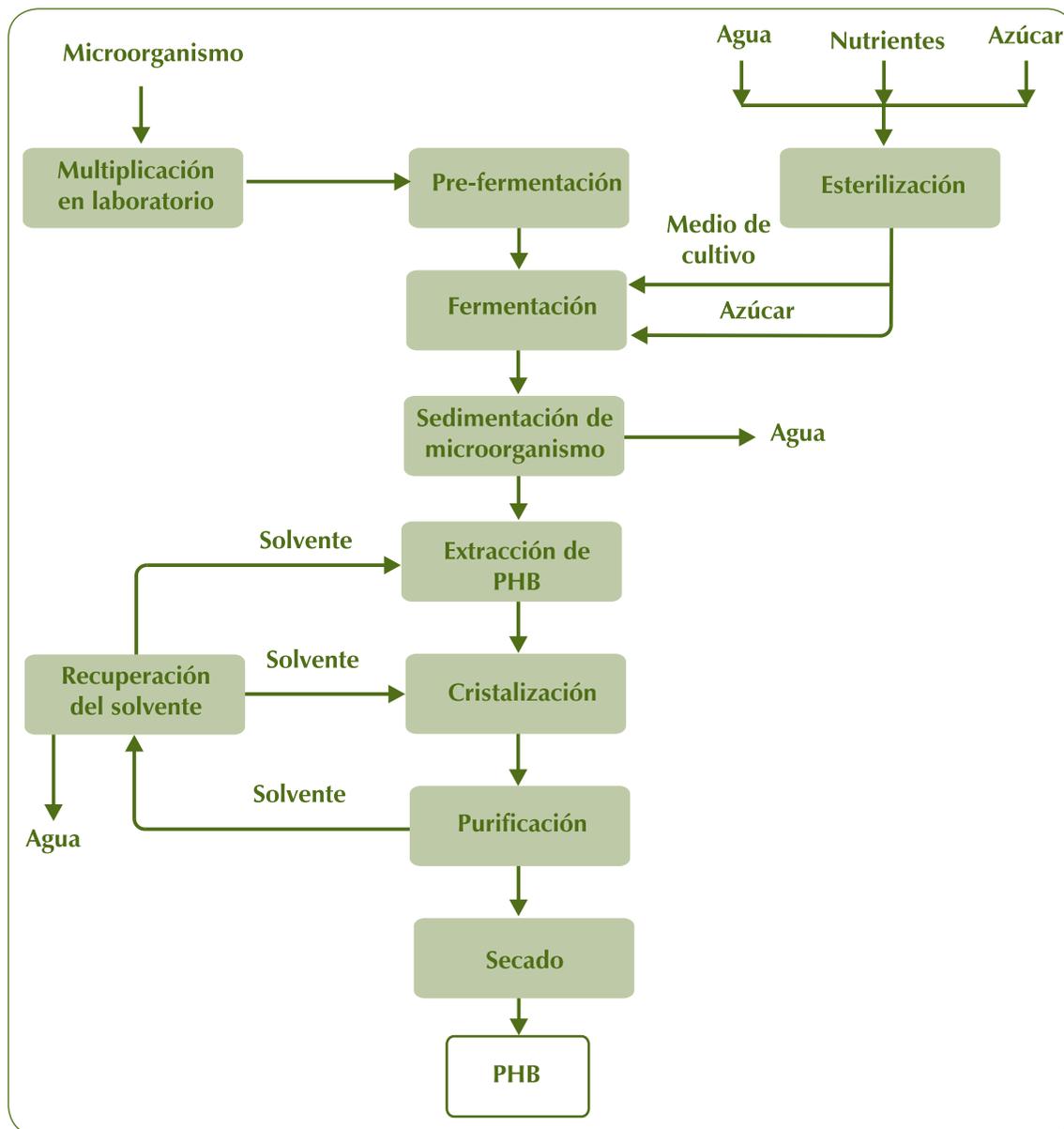
(a)



(b)

Fuente: Akiyama et al. (2003).

Figura 22 – Diagrama de flujo de la producción de PHB a base de azúcar de caña



Fuente: Nonato (2007).

Además de los aspectos económicos, también es importante que el balance energético en el ciclo de vida de estos biopolímeros sea positivo, puesto que también se pretende que sustituyan a los materiales petroquímicos. Normalmente, las ganancias de energía son pequeñas, ya que el suministro de energía se basa, en general, en el uso de combustibles fósiles. En este caso, una vez más, los materiales derivados de la caña llevan ventaja, gracias al uso del bagazo como insumo energético dentro del proceso. En el Gráfico 15 se presenta una com-

paración entre el consumo de energía y las emisiones de GEI en la producción de diversos plásticos, incluyendo cinco materiales de origen fósil – polietileno de baja densidad (LPDE), polietileno de alta densidad (HDPE), polipropileno (PP), poliestireno (PS) y el politereftalato de etilo (b-PET) – y dos poliésteres copoliméricos producidos con biomasa – P(3HA), a base de aceite de soja, y P(3HB), a base de glucosa [Akiyama et al. (2003)].

En Brasil, ya existe una unidad de producción de PHB (polihidroxibutirato) operando en escala piloto, con capacidad de 60 toneladas anuales: PHB Industrial S.A., en Serrana (SP), instalada en forma anexa a la Planta da Pedra, unidad productora de azúcar y bioetanol, responsable del suministro del azúcar utilizada como materia prima y de todo el vapor y energía eléctrica demandados por la planta. La producción a escala industrial está prevista para empezar en 2008, comenzando con 10 mil toneladas por año, destinadas, en principio, al mercado externo [Biocycle (2008)]. En este proceso, presentado en la Figura 22, se promueve la fermentación por microorganismos cultivados aeróbicamente en un medio compuesto por azúcar de caña y nutrientes inorgánicos [Nonato et al. (2001)]. Considerando este esquema de producción, se estima que sólo un 10% de toda la energía consumida en el ciclo de vida del PHB provenga de fuentes no renovables de energía, puesto que el bagazo garantiza toda la energía necesaria para el proceso [Seabra e Macedo (2006)]. Siendo así, es razonable suponer desempeños considerablemente mejores en términos de uso de energía no renovable y de las emisiones de GEI, en comparación a los verificados para los polímeros obtenidos de otras fuentes.



Planta piloto de PHB Industrial S.A. para la producción de plásticos biodegradables a base de azúcar de caña.

Se han presentado algunos análisis de “biorrefinerías” hipotéticas, considerando el uso de tecnologías esperadas como “maduras” en el futuro. Lynd y colaboradores (2005), basados en materiales lignocelulósicos, consideraron la producción futura autosuficiente de potencia, combustibles Fischer-Tropsch e hidrógeno, así como escenarios de co-producción involucrando bioetanol-potencia, bioetanol-potencia-combustibles FT, bioetanol-hidrógeno u otras combinaciones de productos en conjunto con la producción de proteína. En ese análisis, algunos escenarios mostraron eficiencia energética global del orden del 70% y competitividad económica con procesos convencionales, considerando precios de combustibles fósiles de los últimos años.

Un proceso similar de diversificación productiva y valorización de subproductos está en curso en las industrias de base forestal, el cual contempla la producción de papel y de pulpa, energía y una diversidad de productos químicos, contribuyendo a incrementar la eficiencia de los procesos, mejorar la rentabilidad y reducir impactos ambientales [Karlsson (2007)]. Esta agroindustria presenta perspectivas de crecimiento similares a las de la agroindustria de la caña y con seguridad serán posibles sinergias interesantes entre ambas, en el desarrollo de tecnologías y de mercados.

A lo largo de este capítulo fue posible percibir el enorme potencial relacionado con la tecnología de la gasificación, y con las posibilidades de producción de energía y de diferentes combustibles. Para ilustrar el potencial de la hidrólisis basta tener en mente que, cuando la tecnología se vuelva comercial y competitiva, todos los procesos bioquímicos basados en el azúcar para la producción de plásticos, ácidos orgánicos y solventes, entre otros, no quedarán ya restringidos a la industria del azúcar convencional, sino que podrán derivar de otras biomásas.



Capítulo 6

Bioetanol de caña de azúcar en Brasil

La historia casi secular del uso de bioetanol de caña de azúcar como combustible en Brasil ofrece perspectivas interesantes. La progresiva construcción de una estructura institucional y la evolución de los parámetros técnicos agroindustriales trazan una trayectoria ejemplar de ganancias de productividad, que culmina con la paulatina ampliación de los beneficios ambientales, como la reducción de la demanda de agua y el creciente uso de procesos de reciclaje. En este capítulo se analiza más detalladamente el contexto brasileño. Se inicia presentando el desarrollo histórico del uso de bioetanol como combustible, proceso en el cual intervinieron distintos visionarios y técnicos, al mismo tiempo en que se estableció una base legal e institucional que permitió que esta alternativa energética se volviera, progresivamente, un componente regular de la matriz energética brasileña. Luego se presenta el estado actual de la producción de bioetanol en Brasil, describiendo las características principales del parque productor y las perspectivas de evolución de sus indicadores de productividad, basadas en un proceso permanente de innovación tecnológica. Este último tema se analiza en la última sección, destacando cómo la investigación y el desarrollo de métodos, equipos y procesos permitieron que la agroindustria de caña se consolidara como fuente sustentable de energía.

6.1 Evolución del bioetanol combustible en Brasil

En el año 1903, en las conclusiones del I Congreso Nacional sobre Aplicaciones Industriales del Alcohol, ya se recomendaba la implantación de una infraestructura para la producción de bioetanol automotor en Brasil [Goldemberg et al. (1993)]. Con la creación, en 1920, de la Estación Experimental de Combustibles y Minería, futuro Instituto Nacional de Tecnología (INT), se realizaron, con buenos resultados, diversas pruebas en vehículos que funcionan con bioetanol (denominado en la época alcohol-motor), con el objetivo declarado de sustituir la gasolina derivada de petróleo, que no abundaba y era cada vez más cara [Castro e Schwartzman (1981)]. Entre los pioneros del uso vehicular de bioetanol se destacan Heraldo de Souza Mattos (en 1923 participó en carreras automovilísticas utilizando bioetanol hidratado puro como combustible), Fernando Sabino de Oliveira (autor del libro *O álcool-motor e os motores a explosão [El alcohol motor y los motores de combustión interna]*, publicado en 1937) y Lauro de Barros Siciliano (escribió varios estudios técnicos sobre el uso de bioetanol en motores), quienes dirigieron ensayos de laboratorio y pruebas en carreteras, con el objetivo de motivar al gobierno y empresarios (Vargas, 1994).



Vehículo Ford adaptado por el INT en el año 1925 para demostraciones del uso de bioetanol puro como combustible.

Basándose en estas experiencias para reducir los impactos de la total dependencia de combustibles derivados de petróleo y utilizar los excedentes de producción de la industria azucarera, el gobierno brasileño determinó, mediante el Decreto 19.717, firmado en 1931 por

el presidente Getúlio Vargas, la mezcla obligatoria de al menos un 5% de bioetanol anhidro con la gasolina. Al comienzo este requisito era sólo para la gasolina importada, pero después pasó a ser también requerido para la gasolina producida en Brasil. La responsabilidad de establecer precios, cuotas de producción por ingenio y porcentajes de mezcla se le atribuyó al Instituto del Azúcar y del Alcohol (IAA) [Brasil (1931)]. De este modo, el uso de bioetanol como combustible automotor, conocido hace más de un siglo por la industria automovilística, se utiliza regularmente en Brasil desde el año 1931, contemporáneo a la introducción de los automóviles como medio de transporte en el país.

La concentración de bioetanol en la gasolina brasileña varió en las décadas siguientes, alcanzando un promedio de 7,5% hasta 1975, cuando los efectos de la primera crisis del petróleo impusieron la necesidad de expandir el empleo de este biocombustible en los motores. Debido a la elevación de los precios internacionales del petróleo, los gastos de su importación aumentaron de U\$S 600 millones, en 1973, a U\$S 2.500 millones, en 1974, contribuyendo a un déficit en la balanza comercial de U\$S 4,7 mil millones. En los años siguientes, estos resultados pesaron fuertemente en la deuda externa brasileña y en la escalada de la inflación. En el actual contexto del mercado energético, en el cual diversos países consideran que el bioetanol es una opción energética viable, es interesante volver a analizar los principales marcos históricos que permitieron consolidar la producción de bioetanol combustible en Brasil.

Durante la primera mitad de la década de 1970, con el objetivo de articular una respuesta a la nueva situación energética configurada por las crisis del petróleo, se desarrolló una propuesta para reducir la dependencia de petróleo importado, involucrando a empresarios visionarios como Lamartine Navarro Jr. y Cícero Junqueira Franco. La propuesta tomó en cuenta la preferencia del Instituto del Azúcar y del Alcohol por la producción exclusiva de bioetanol directo en destilerías autónomas y el interés de Copersucar, principal cooperativa de productores de azúcar, que pretendía aprovechar la capacidad ociosa de las destilerías anexas a las plantas azucareras. En el marco de esta propuesta, en marzo de 1974 se le entregó al Consejo Nacional de Petróleo un documento con las recomendaciones de las discusiones entre el sector privado y el gobierno [Bertelli (2007)].

Otro hecho relevante para la definición gubernamental a favor del incremento del uso de bioetanol fue la visita del entonces presidente Ernesto Geisel al Centro Tecnológico de la Aeronáutica, en junio de 1975. Allí se le presentaron los trabajos desarrollados por el profesor Urbano Ernesto Stumpf sobre el empleo de bioetanol en motores, utilizando gasolina con mayores concentraciones de bioetanol anhidro y probando el uso exclusivo de bioetanol hidratado en motores adaptados. En esa oportunidad, quedó claro que Brasil podría contar con una buena solución: por el lado de la oferta, podría incrementar la producción de bioetanol usando la capacidad ociosa de las plantas productoras de azúcar; y por el lado del consumo, podría ampliar la concentración de bioetanol en la gasolina y, eventualmente, utilizar bioetanol puro.

Partiendo de esas premisas, y luego de nuevos estudios y debates, el gobierno federal instituyó el Programa Nacional del Alcohol (Proálcool), mediante el Decreto 76.593 del 14 de noviembre de 1975, firmado por el presidente Geisel. Este decreto estableció líneas específicas de financiamiento, formalizó la creación de la Comisión Nacional del Alcohol (CNA), responsable de la gestión del programa, y determinó una paridad de precio entre el azúcar común *standard* y el bioetanol, estimulando la producción de este biocombustible, que había sido hasta entonces un subproducto menos valorado. En este contexto, se establecieron como metas la producción de 3 mil millones de litros de bioetanol para el año 1980, y de 10,7 mil millones de litros para 1985.

Durante los primeros años de la implementación del proálcool, la actuación del ministro de la Industria y Comercio, Severo Gomes, fue decisiva, contándose además con la colaboración del secretario de Tecnología Industrial, José Walter Bautista Vidal, para el diseño inicial del programa y, luego, en la fase de mayor expansión a partir del año 1979, con el apoyo del ministro João Camilo Pena. Ambos se mostraron muy comprometidos con el programa de bioetanol combustible y crearon las bases para su consolidación. Como un mensaje de esta generación de pioneros, el libro *Energia da biomassa – Alavanca de uma nova política industrial [Energía de la biomasa – elogio de una nueva política industrial]* señala la necesidad de transitar desde los sistemas energéticos convencionales hacia la “civilización de la fotosíntesis” [Guimarães et al. (1986)].

Gracias a un marco legal decididamente favorable al bioetanol, su producción se amplió de modo significativo. Entre 1975 y 1979, la producción de bioetanol (anhidro e hidratado) pasó de 580 mil m³ a 3.676 mil m³, superando la meta establecida para aquellos años en un 15%. Debido al recrudescimiento de la crisis del petróleo, en el año 1979, cuando sus precios sufrieron un nuevo aumento, se intensificó el programa Proálcool, estimulándose el uso del bioetanol hidratado en motores adaptados o producidos específicamente para el empleo de este biocombustible. En esa época, la dependencia de petróleo importado en Brasil era del orden de 85%, equivalente a un 32% del total de las importaciones brasileñas, con impactos aún más graves sobre la economía nacional, lo que justificaba la meta ambiciosa de producir 10,7 mil millones de litros de bioetanol en el año 1985. Con ese objetivo, mediante el Decreto 83.700 de 1979, el gobierno federal reforzó el apoyo a la producción de alcohol, creando el Consejo Nacional del Alcohol (CNAL), al cual se le asignó la conducción general del Proálcool, y la Comisión Ejecutiva Nacional del Alcohol (Cenal), al que se responsabilizó de la implementación del programa [CGEE (2007a)]. En tales condiciones, la producción de bioetanol alcanzó 11,7 mil millones de litros en 1985, excediendo en un 9% la meta inicial.

En síntesis, el conjunto de incentivos adoptados por el Proálcool en esa época, que se mostró capaz de motivar a los agentes económicos, incluían: a) definición de niveles mínimos en la concentración de bioetanol anhidro en la gasolina, que se elevaron, progresivamente, hasta alcanzar el 25%; b) garantía de precios para el consumidor, asegurándole que el precio del bioetanol hidratado sería menor que el de la gasolina (en aquella época, los precios de los combustibles de toda la cadena productiva eran determinados por el gobierno federal); c) ga-

rantía de remuneración competitiva para el productor de bioetanol, incluso frente a precios internacionales más atractivos para el azúcar que para el bioetanol (subsidio de competitividad), d) apertura de líneas de crédito con préstamos en condiciones favorables para que los dueños de ingenio pudieran incrementar su capacidad de producción; e) reducción de los impuestos (en la venta de autos nuevos y en el permiso anual de circulación) a los vehículos que funcionaban con bioetanol hidratado; f) establecimiento de la obligatoriedad de venta de bioetanol hidratado en las estaciones de servicio; y g) mantenimiento de stocks estratégicos para asegurar el abastecimiento entre los períodos de cosecha de la caña.

El panorama se transformó bastante en el año 1985, debido a la reducción de los precios del petróleo y a la recuperación de los precios del azúcar. Esto desmotivó la producción de bioetanol y llevó a una situación difícil que terminó con la fase de expansión de Proálcool. En 1986, el gobierno federal revisó las políticas de fomento y redujo la rentabilidad media de la agroindustria de la caña, lo cual estimuló aún más el uso de la materia prima disponible en la fabricación de azúcar para exportación. Debido al desinterés gubernamental con respecto al bioetanol y a la ausencia de políticas específicas para este biocombustible, en el año 1989 los consumidores de bioetanol comenzaron a enfrentar discontinuidades en la oferta. Los mecanismos de formación de stocks de seguridad no funcionaron y fueron necesarias medidas de emergencia, como la reducción de la concentración de bioetanol en la gasolina, la importación de bioetanol y el uso de mezclas de gasolina con metanol como sustituto de bioetanol.

Una consecuencia duradera de esta crisis de abastecimiento – precisamente un producto nacional sobre el cual la propaganda decía “puede usarlo que no faltará” – fue la pérdida de la confianza del consumidor brasileño, que llevó, inevitablemente, a la caída de las ventas de los automóviles que utilizan bioetanol puro. Así, luego de haber representado el 85% del total de vehículos nuevos comercializados en 1985, las ventas de ese tipo de vehículos cerraron la década con una participación de apenas 11,4% en el año 1990 [Scandiffio (2005)]. Sólo a partir de mediados de 2003, con el lanzamiento de los vehículos flexibles, el consumo de bioetanol hidratado volvió a crecer de modo significativo.

Es interesante observar que, aún en esta época de aparente indefinición sobre el futuro del bioetanol, estudios independientes sugirieron la necesidad de mantener el programa en funcionamiento. Se proponía ajustar su tasa de crecimiento al nuevo contexto, pero asegurando la continuidad del programa, no sólo por los beneficios ambientales y sociales asociados, sino también por las ganancias de productividad que se habían alcanzado y que le permitían al bioetanol ser competitivo frente a un precio del petróleo de U\$S 30 el barril [Serôa da Motta y Ferreira (1988)].

Hasta el inicio de los años noventa, las características estructurales básicas de la agroindustria sucroalcoholera en Brasil, resultantes de décadas de rígido control estatal, se caracterizaba por una producción agrícola e industrial bajo control de las plantas, heterogeneidad productiva (especialmente en la producción de la caña), reducido aprovechamiento de subproductos y competitividad fundamentada, en gran medida, en los bajos sueldos y la producción extensiva. Las diferencias técnicas entre las unidades productivas de las regiones norte, nordeste y

centro sur e, incluso dentro de las regiones, eran significativas y existían importantes diferencias de productividad y escala de producción [CGEE (2007a)].

En el centro de los cambios administrativos implantados al comienzo de los años noventa, que revisaron la función del Estado en la economía nacional, el gobierno brasileño impulsó el proceso de liberalización y reordenación institucional del sector sucroalcoholero, clausuró el Instituto del Azúcar y del Alcohol y transfirió la gestión de los temas relativos al bioetanol al Consejo Interministerial del Alcohol (CIMA), presidido por el Ministerio de la Industria y Comercio hasta 1999, cuando pasó a depender del Ministerio de la Agricultura. Con la progresiva retirada de subsidios y el fin de la regulación de precios del bioetanol, a partir del año 1991, se inició la liberación total de precios del sector sucroalcoholero, proceso que concluyó en 1999. De este modo, comenzó a operar un nuevo modelo de relación entre productores de caña de azúcar, productores de bioetanol y empresas distribuidoras de combustible, en el cual se adoptaron las reglas de mercado actualmente vigentes en el país. Del estado original de medidas legales y tributarias que permitieron consolidar el bioetanol combustible en Brasil, permanece vigente sólo la tributación diferencial del bioetanol hidratado y de los vehículos a bioetanol, buscando asegurarle al consumidor condiciones paritarias al uso de bioetanol hidratado o de gasolina.

En este contexto, los precios del bioetanol anhidro o hidratado se negocian libremente entre los productores y las distribuidoras. En el marco de la agroindustria, el precio de la caña es libre, aunque generalmente ha sido determinado según un modelo contractual establecido en bases voluntarias, y coordinado conjuntamente por los plantadores de caña y los productores de bioetanol y azúcar. En este modelo, el azúcar que contiene la caña que llega para ser procesada, así como el azúcar y el bioetanol producidos por las plantas, se convierten en una base común de comparación: los azúcares totales recuperables, ATR. Siguiendo ese concepto, la caña se paga según su aporte efectivo a la producción, medido por el ATR presente en la materia prima entregada a la agroindustria, en donde a su vez los precios se determinan por el resultado económico de los productos obtenidos, azúcar y bioetanol, una vez consideradas las ventas para los mercados interno y externo. En el marco del Estado de São Paulo y regiones vecinas, este modelo es gestionado por el Consejo de los Productores de Caña, Azúcar y Alcohol del Estado de São Paulo (Consecana), constituido en 1997 e integrado por representantes de todos los sectores privados involucrados [Scandiffio (2005)].

El proceso de redefinición de la función y de la forma de actuación de los agentes económicos no ocurrió de forma suave y consensual, sino con grandes divergencias entre empresarios conservadores, que pretendían mantener el aparato intervencionista y sus garantías de mercado y realización de beneficios, y otros progresistas, que deseaban un mercado más libre, que posibilitara la inversión y obtención de ganancias por diferenciales de productividad. Con el paso del tiempo el segundo grupo prevaleció. En ese sentido, resultó esencial la existencia de un marco institucional que marcó y consolidó las transformaciones implementadas.

Siguiendo con la reestructuración institucional en el marco de la agroindustria del bioetanol, en 1997 se crearon dos instituciones importantes, por medio de la Ley 9.478: el Consejo

Nacional de Política Energética (CNPE), cuyas atribuciones incluyen el establecimiento de directrices para programas específicos de uso de los biocombustibles; y la Agencia Nacional del Petróleo (ANP), que luego, mediante la Ley 11.097, de 2005, se pasó a denominar Agencia Nacional del Petróleo, Gas Natural y Biocombustibles, ampliando su área de actuación. Entre las atribuciones de la ANP están promover la regulación, la contratación y la fiscalización de las actividades económicas de los biocombustibles, debiendo implementar la política nacional de biocombustibles, con énfasis en la garantía de suministro en todo el territorio nacional y la protección de los intereses del consumidor en lo relativo a precio, calidad y oferta de productos. Más específicamente, son atribuciones de la ANP: fiscalizar y aplicar las sanciones administrativas y monetarias previstas en ley o contrato; hacer cumplir las buenas prácticas de conservación y uso racional de los biocombustibles y de preservación del medio ambiente; organizar y conservar el acervo de informaciones y datos relativos a las actividades reguladas de la industria de los biocombustibles; y especificar la calidad de los biocombustibles. Esta última atribución es de gran relevancia, presuponiendo un adecuado soporte técnico y el establecimiento de espacios de interlocución entre productores de bioetanol, fabricantes de motores y agencias ambientales. Como se comentó en el Capítulo 2, la especificación del bioetanol anhidro e hidratado para fines combustibles es definida por una resolución de la ANP.

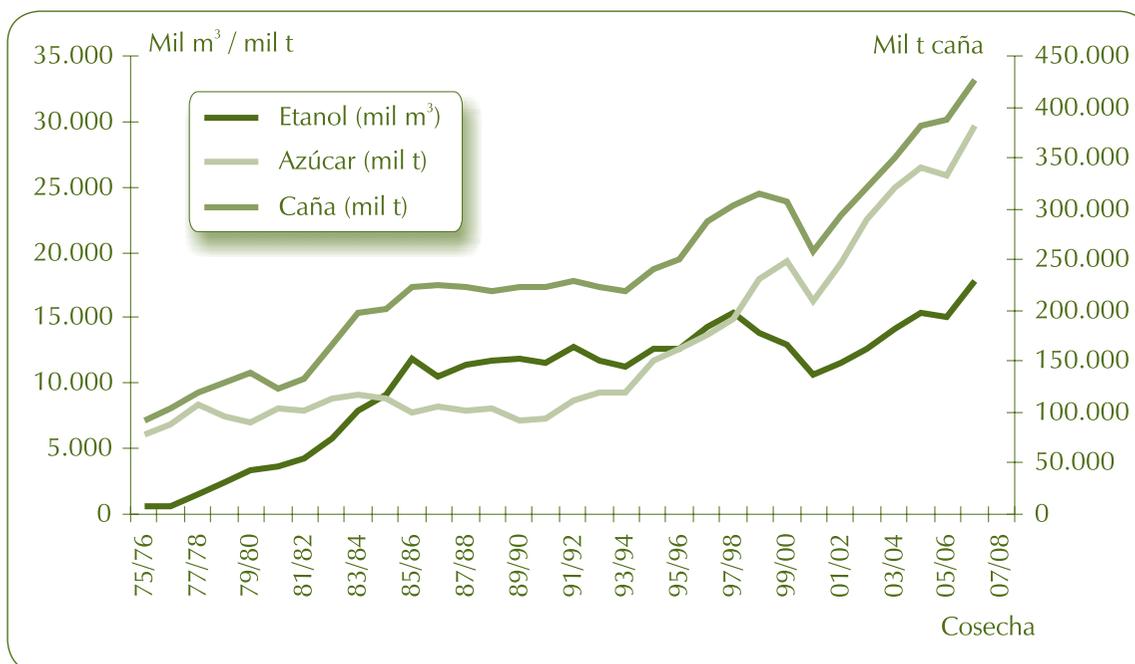
El proceso de revisión institucional del bioetanol concluye con la creación, por parte del Gobierno Federal, del Consejo Interministerial del Azúcar y del Alcohol (Cima), mediante el Decreto 3.546, de 2000. Esta entidad tiene el objetivo de decidir las políticas relacionadas con las actividades del sector sucroalcoholero, considerando, entre otros, los siguientes aspectos: a) una adecuada participación de los productos de caña de azúcar en la matriz energética nacional; b) los mecanismos económicos necesarios para el auto mantenimiento sectorial; y c) el desarrollo científico y tecnológico del sector. El CIMA está integrado por el ministro de Agricultura y Abastecimiento, quien lo preside, y los ministros de Hacienda, Desarrollo, Industria y Comercio Exterior y de Minas y Energía. Entre las atribuciones más importantes de este consejo están la definición y la revisión periódica de la concentración de bioetanol en la gasolina, en una franja entre 20% y 25%. En los últimos años, esa concentración ha sido del 25%, aunque puede reducirse (y efectivamente lo ha hecho) debido a las disponibilidades y las condiciones del mercado.

En el año 2003 surgieron los automoviles *flex-fuel*, con gran aceptación por parte de los consumidores. Este éxito se debe a que el propietario del vehículo puede elegir entre usar gasolina (con un 25% de bioetanol anhidro) y/o bioetanol hidratado, dependiendo del precio, autonomía, desempeño o disponibilidad. Gracias a eso se recuperó el consumo del bioetanol hidratado en el mercado interno y surgieron nuevas perspectivas para la expansión de la agroindustria de caña, que se suman a las posibilidades de expansión de la demanda internacional de bioetanol anhidro usado en mezclas con gasolina. Desde entonces, la agroindustria brasileña de caña ha crecido a tasas elevadas, consolidándose económicamente y presentando indicadores positivos de sostenibilidad ambiental, como se verá en el este libro.

Los Gráficos 16, 17 y 18 sintetizan bien el proceso de expansión de la producción de bioetanol durante las últimas décadas, comentado en los párrafos anteriores. El Gráfico 16 destaca cómo la producción de caña y bioetanol (anhidro e hidratado), acompañada del incremento de la producción de azúcar, respondió bien a la expansión de la demanda de este biocombustible [Unica (2008)]. A la vez, el Gráfico 17 ilustra la evolución de la concentración de bioetanol anhidro en la gasolina [MME (2008) y Mapa (2008)]. Finalmente, el Gráfico 18 ilustra el crecimiento de la producción de vehículos a bioetanol hidratado. En la primera fase del Proálcool, la flota a bioetanol alcanzó 2,5 millones de vehículos ya en 1985, representando más del 90% de las ventas realizadas de autos nuevos, participación recuperada sólo a partir del año 2003 con el lanzamiento de los vehículos flexibles [Anfavea (2008)].

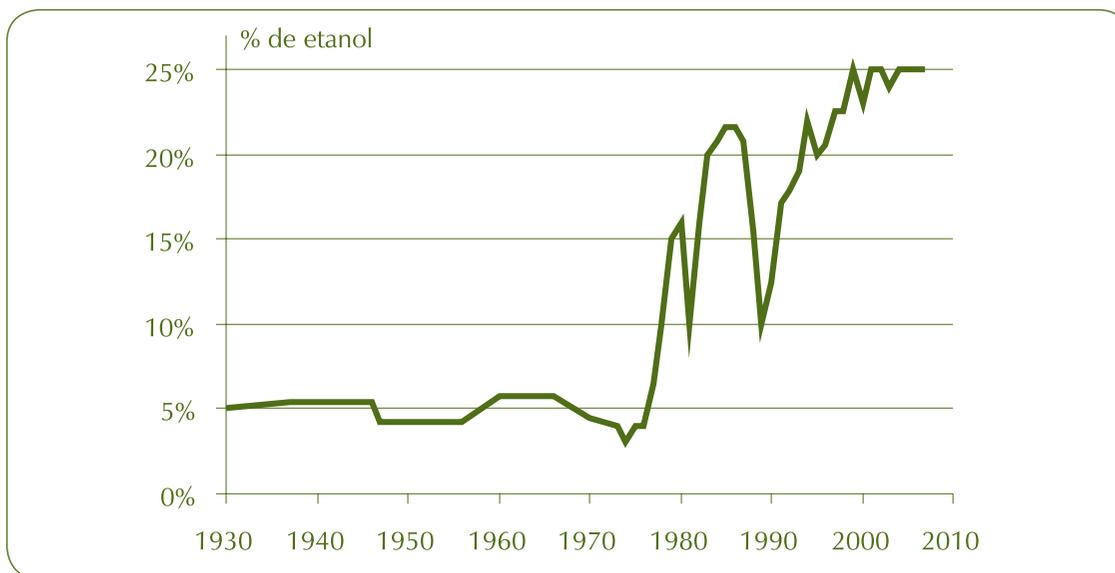
En la actualidad, 5,5 millones de vehículos (con motores para bioetanol hidratado y motores flexibles) pueden utilizar regularmente este biocombustible en Brasil, lo que equivale a cerca de un 20% de la flota automotriz, de 25,6 millones de vehículos.

Gráfico 16 - Evolución de la producción de caña de azúcar, etanol y azúcar en Brasil



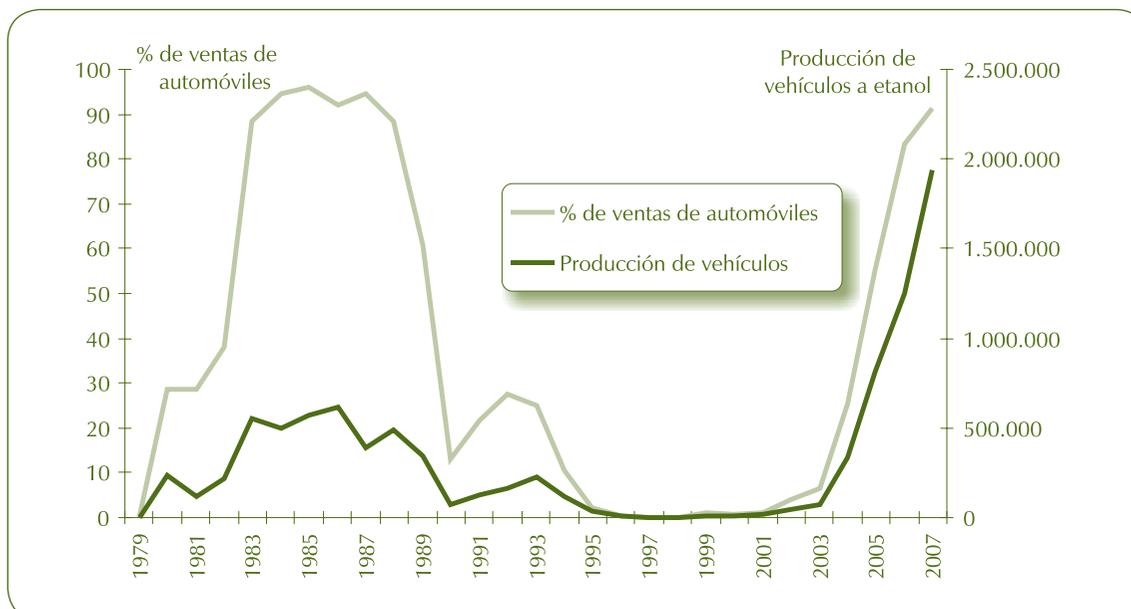
Fuente: Unica (2008).

Gráfico 17 – Promedio de concentración de etanol anhidro en la gasolina brasileña



Fuente: MME (2008).

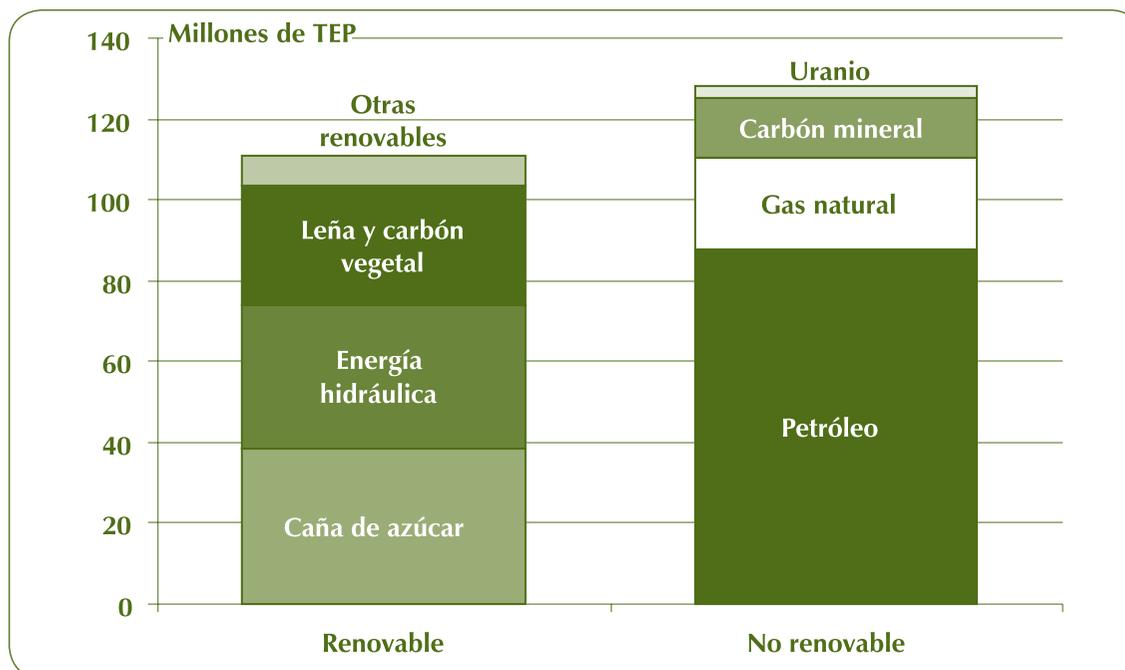
Gráfico 18 – Evolución de la producción de vehículos a etanol hidratado y de su participación en las ventas de vehículos nuevos



Fuente: Anfavea (2008).

Los Gráficos 16, 17 y 18 destacan muy bien cómo, a pesar del estancamiento de las ventas de vehículos a bioetanol hidratado durante los años noventa, la demanda de este biocombustible se mantuvo más o menos constante, gracias al uso de la mezcla con gasolina. Ello permitió mantener estable la operación de las unidades productoras hasta el inicio de la presente década, cuando comenzó el nuevo ciclo de crecimiento. Así, desde los años setenta, el bioetanol es usado regularmente en cantidad importante en Brasil y no se vio afectado por la caída en las ventas de los automóviles a bioetanol hidratado, excepto en los últimos años de la década pasada, cuando las cosechas de caña sufrieron caídas por problemas climáticos. Las perspectivas a corto plazo apuntan a un importante crecimiento de la demanda interna de bioetanol hidratado, con expectativas de que en el año 2010 la flota de vehículos aptos para este biocombustible llegue a 9 millones de unidades, que representarían el 32% de la flota total de vehículos prevista para ese año [Pires (2007)].

Gráfico 19 – Fuentes primarias de energía utilizadas en Brasil en el año 2007



Fuente: MME (2008).

Desde el punto de vista económico, se estima que la implementación del Proálcool, entre 1975 y 1989, costó aproximadamente U\$S 7.100 millones, de los cuales U\$S 4.000 millones fueron financiados por el gobierno brasileño y el restante aportado por el sector privado [Dias Leite (2007)]. Considerando el volumen de bioetanol combustible consumido en el período de 1976 a 2005, y valorándolo a los precios de la gasolina en el mercado mundial, se estima una economía de divisas de U\$S 195.500 millones, de los cuales U\$S 69.100 millones

corresponden a importaciones evitadas y U\$S 126.400 millones a intereses de la deuda externa evitados [BNDES (2006)].

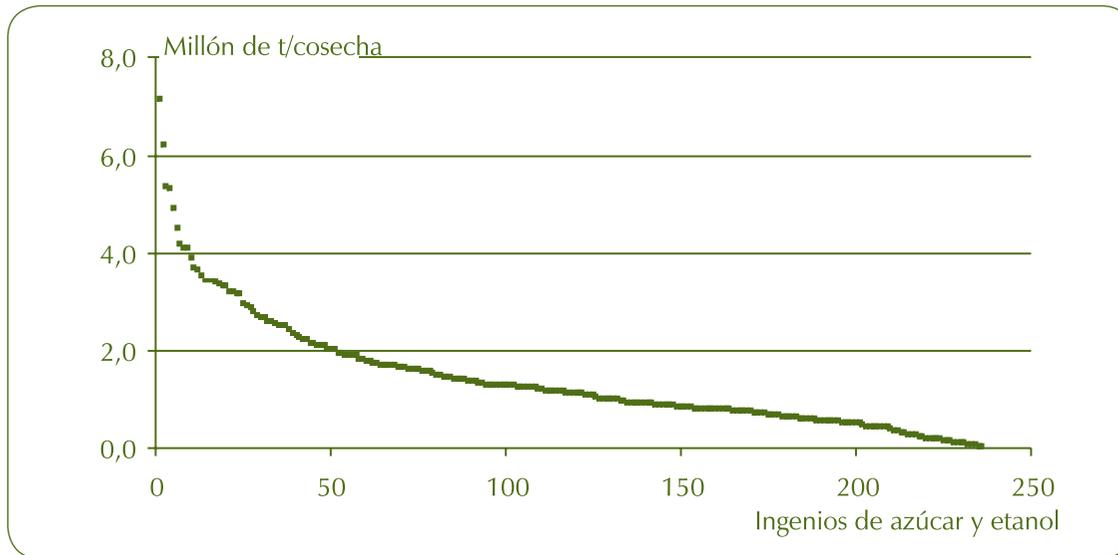
Como un resultado que sintetiza la importancia de la cadena bioenergética de la caña de azúcar en Brasil, en el año 2007 la participación de este segmento en la matriz energética nacional alcanzó el 16%, superior a la energía hidroeléctrica (responsable del 90% de la electricidad producida en el país), y equivalente al 36,4% de las energías renovables en el abastecimiento nacional de energía primaria (ver Gráfico 19).

6.2 Agroindustria de la caña de azúcar en Brasil

La caña de azúcar es cultivada en Brasil desde 1532. Fue introducida en el país por Martim Afonso, el primer colonizador portugués, con el propósito de establecer ingenios azucareros similares a los que existían por aquella época en las Islas Azores. Esta especie se adaptó bien al suelo brasileño y durante todo el período colonial, se cultivó con buenos resultados. Los principales cultivos se realizaron a lo largo de la costa brasileña, en donde se construyeron decenas de ingenios, en especial en el *Recôncavo Baiano* y en Pernambuco, promoviendo, durante casi dos siglos, el importante ciclo de la economía de caña en Brasil. Con la expulsión de los holandeses del nordeste y la expansión de la agroindustria azucarera en la región de las Antillas, a mediados del siglo XVII, la producción brasileña se redujo bastante. Pese a ello se mantuvo como una importante actividad de la economía brasileña, fortalecida a partir de la creación del Instituto del Azúcar y del Alcohol, en 1933, cuando el uso del bioetanol automotor ya era una realidad naciente. También, a partir de esta época, la agroindustria de caña empezó a expandirse en la región sudeste, asociada inicialmente a la decadencia en el cultivo del café y luego al crecimiento del mercado interno [Szmrecányi (1979)].

En la actualidad, el cultivo de la caña ocurre en casi todos los estados brasileños y ocupa cerca de un 9% de la superficie agrícola del país, siendo el tercer cultivo más importante en superficie ocupada, después de la soya y del maíz. En el año 2006, el área cosechada fue de alrededor de 5,4 millones de hectáreas, en un área plantada de más de 6,3 millones de hectáreas y con una producción total de 425 millones de toneladas [Carvalho (2007)]. La principal región productora es la centro-sur-sudeste, con más del 85% de la producción, y el mayor productor nacional es el Estado de São Paulo, con cerca de un 60% de la producción. El sistema de producción involucra más de 330 plantas, cuyas capacidades de procesamiento varían entre 600 mil y 7 millones de toneladas por año, para un promedio anual de 1,4 millones de toneladas. La distribución de la capacidad anual de molienda se muestra en el Gráfico 20 (valores para la cosecha 2006/2007). Como se puede ver, las diez mayores plantas responden por el 15% del total de materia prima procesada, mientras que las 182 unidades menores procesan la mitad de la caña. Estos números muestran la baja concentración económica de esta agroindustria, propia de los sistemas bioenergéticos.

Gráfico 20 – Distribución de la capacidad anual de procesamiento de las plantas de azúcar y etanol en Brasil

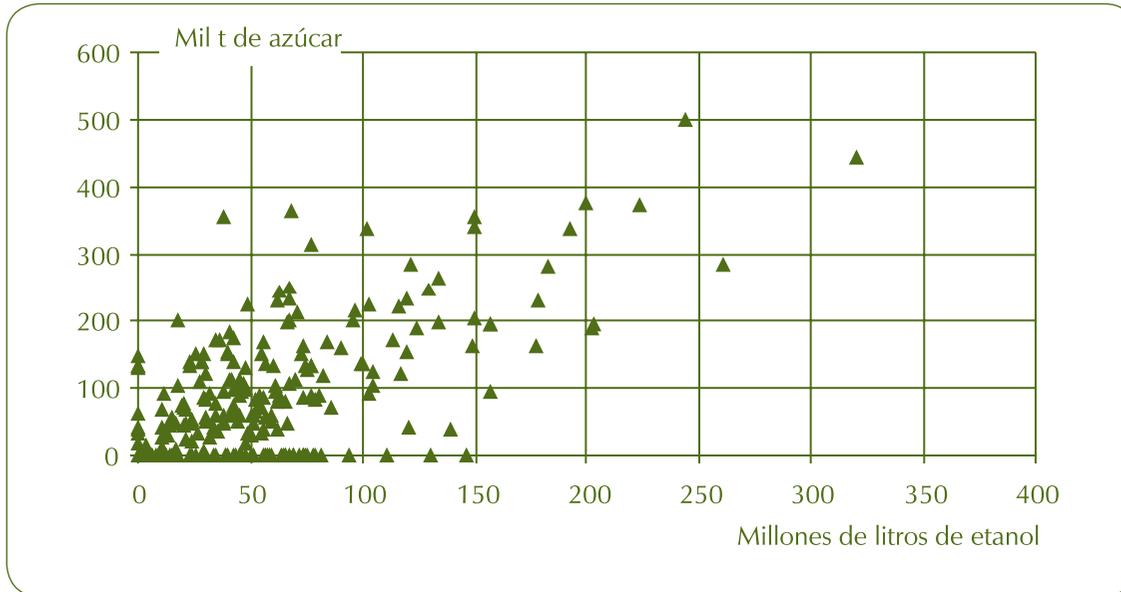


Fuente: Elaborado en base a Idea (2007).

En promedio, las plantas brasileñas utilizan un 80% de la caña proveniente de tierras propias y alquiladas o de accionistas y compañías agrícolas con alguna vinculación a las plantas. El 20% restante es suministrado por cerca de 60 mil productores independientes, que utilizan menos de dos unidades agrícolas. La unidad agrícola corresponde a la menor unidad de fraccionamiento del suelo rural necesaria para el sustento de una familia, y varía según la región. Por lo tanto, gran parte de los productores de caña se pueden caracterizar como pequeños productores agrícolas, que se dedican a la caña y a otros productos agropecuarios para fines económicos y de consumo propio, y que cuentan, generalmente, con el apoyo tecnológico de las plantas (CGEE/NAE, 2005).

Desde el punto de vista del perfil de producción, las plantas brasileñas se pueden clasificar en tres tipos de instalaciones: las plantas que producen exclusivamente azúcar; las plantas de azúcar con destilerías anexas, que producen azúcar y bioetanol; y las instalaciones que producen exclusivamente bioetanol, o destilerías autónomas. La mayoría de las instalaciones está formada por plantas de azúcar con destilerías anexas (cerca de un 60% del total), seguidas por una considerable cantidad de destilerías autónomas (cerca de un 35%) y por algunas unidades de procesamiento exclusivo de azúcar, según se indica en el Gráfico 21. Como promedio nacional, aproximadamente un 55% de los azúcares disponibles en la caña procesada se destinaron a la producción de bioetanol en la cosecha 2006/2007 [Unica (2008)].

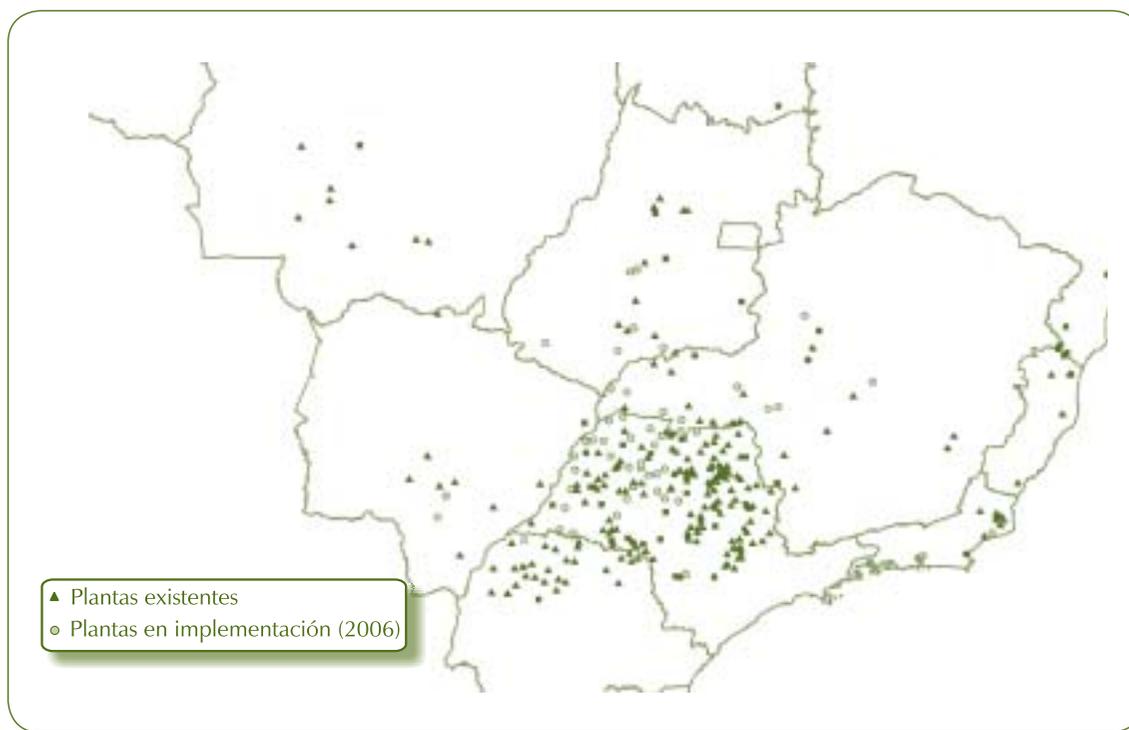
Gráfico 21 – Perfiles de producción de los ingenios de azúcar y etanol en Brasil en la cosecha 2006/2007



Fuente: Elaborado en base a Idea (2007).

Las plantas de azúcar y bioetanol se ubican junto a las regiones productoras de caña, y la mayor parte de ellas se localizan en el Estado de São Paulo, como se mostró en la Figura 9. En ese Estado las excelentes condiciones de suelo y clima se conjugan con la existencia de una adecuada infraestructura de transportes, proximidad de los mercados consumidores y una activa base de desarrollo científico y tecnológico, que ha sido fundamental para el proceso de expansión con incrementos de productividad, observado en este sector. Sin embargo, en los últimos años, debido a la relativa saturación de las áreas disponibles en ese Estado y a la elevación de los costos de la tierra, las nuevas unidades de producción se están instalando en áreas antes ocupadas por pastos y, en menor grado, por cultivos anuales en la región del *Triângulo Mineiro*, Sur de Goiás y Sudeste de Mato Grosso do Sul. Esas áreas están contiguas a las tradicionales regiones productoras de caña del centro-sur brasileño, como se muestra en la Figura 24, situación que permite desarrollar sistemas productivos similares a los existentes en São Paulo.

Figura 24 – Localización de los nuevos ingenios de azúcar y etanol en Brasil



Fuente: CGEE (2006).

Según los números de la cosecha 2006/2007, el agronegocio de la caña de azúcar — que engloba la producción de caña, azúcar y bioetanol — mobilizó en 2007 cerca de R\$ 41.000 millones, correspondientes a facturaciones directas e indirectas. Durante ese período de cosecha se procesaron 420 millones de toneladas de caña, se produjeron 30 millones de toneladas de azúcar y 17.500 millones de litros de bioetanol, y se exportaron 19 millones de toneladas de azúcar (U\$S 7.000 millones) y 3.000 millones de litros de bioetanol (U\$S 1.500 millones), representando el 2,65% del Producto Interno Bruto (PIB). Además, se recolectaron R\$ 12.000 millones en impuestos y otras contribuciones y se realizaron inversiones anuales de R\$ 5.000 millones en nuevas unidades agroindustriales [ProCana (2008)]. Estos resultados elocuentes se alcanzaron mediante la contribución de un conjunto de unidades productoras caracterizadas por su heterogeneidad en relación con la escala de producción, el tamaño, la localización geográfica, las estructuras productivas y los perfiles financieros y administrativos. En este contexto, por lo tanto, se observan diferencias en costos de producción y en niveles de eficiencia, principalmente como resultado de la significativa evolución del sector sucroalcoholero durante las últimas décadas, en términos de capacidad, perfil productivo y flexibilización del marco regulatorio.

Las plantas brasileñas de azúcar y bioetanol actualmente en operación se pueden clasificar en tres grupos, dependiendo de su situación financiera, los indicadores de productividad y la introducción de tecnologías innovadoras (modificado de IEL/Sebrae, 2006):

Empresas estancadas: plantas en situación crítica o precrítica, debido a su volumen de deudas acumuladas y al desfase tecnológico, con reducidas posibilidades de actuar en forma individual, en un sector con elevada competitividad interna. Esta situación sólo se podrá revertir con el aporte de nuevos recursos y líneas específicas de financiamiento, a fin de actualizar las tecnologías empleadas y permitir el incremento de la productividad agroindustrial.

Empresas rentables: plantas que lograron enfrentar con éxito la desregulación sectorial y la indefinición de la política energética brasileña, expandiendo la capacidad de producción e invirtiendo en nuevas tecnologías, con reducción de costos y aumento de la productividad. De forma aislada o en grupos, algunas de estas empresas diversificaron sus actividades para la comercialización y la logística de exportación de sus productos.

Empresas innovadoras: empresas rentables que, de forma aislada o en asociaciones con empresas multinacionales, se diferenciaron del grupo anterior, diversificando su base tecnológica hacia la producción de derivados del azúcar y abriendo nuevas perspectivas para el agregado de valor a la caña de azúcar.

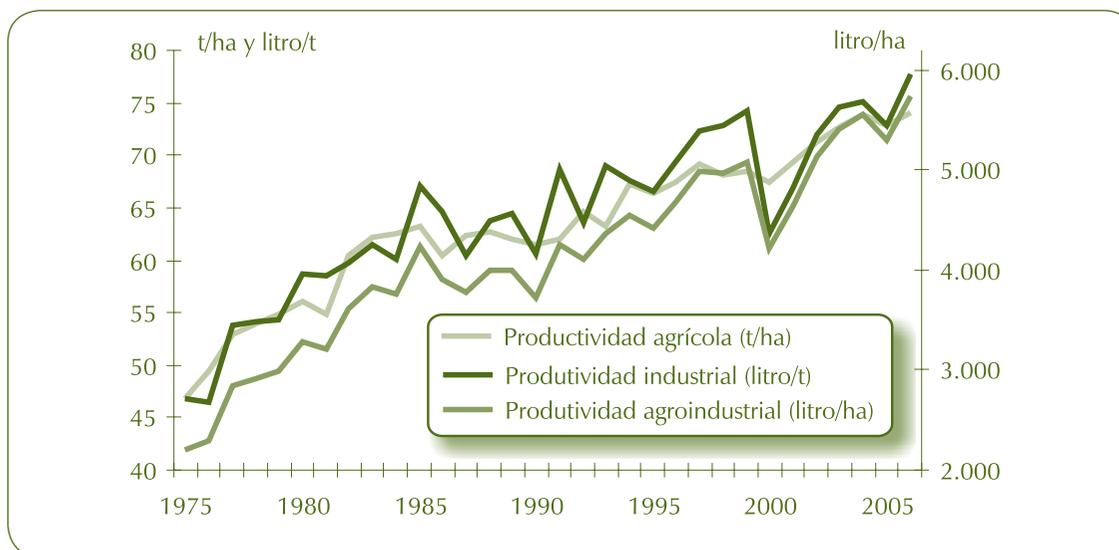
Asociada a la expansión de la producción sucroalcoholera, se está dando una importante diversificación en la composición y el origen del capital invertido en esta agroindustria. Originalmente ese capital provenía casi en su totalidad de empresas familiares, en buena parte creadas y administradas por inmigrantes italianos y sus descendientes, en la región centro sur, y por familias de la región, en el caso del nordeste. En la actualidad, además de las empresas familiares, se observa la apertura de capital en diversas empresas (Cosan, Costa Pinto, Guarani, Nova America, São Martinho) y la entrada de inversionistas estratégicos nacionales (Votorantim, Vale, Camargo Correa, Odebrecht) y extranjeros de origen diverso: francés (Te-reos, Sucden, Louis Dreyfus), alemán (Sudzucker), estadounidense (Bunge, Comanche Clean Energy, Cargill, Global Foods), español (Abengoa), guatemalteco (Ingenio Pantaleón), hindú (Bharat Petroleum, Hindustran Petroleum, India Oil), británico (ED&F Man, British Petroleum), malayo (Kouk) y japonés (Mitsui, Marubeni).

Otra innovación importante en este sector es la presencia de inversionistas financieros, nacionales y extranjeros o en asociación con operadores nacionales. En este último caso, se pueden mencionar los fondos formados específicamente para implementar plataformas de producción y comercialización de bioetanol de caña de azúcar, como Infinity Bio-Energy, Brenco (Empresa brasileña de energía renovable) y Clean Energy Brazil. El modelo típico de los negocios que involucran capital extranjero incluye socios brasileños, con importante par-

ticipación de empresas extranjeras en las decenas de operaciones de adquisiciones y fusiones realizadas en los últimos años. Aunque tal diversificación sea un proceso de mucha importancia, que destaca la confianza de los inversionistas y la introducción de nuevos conceptos de gestión y gobernabilidad, el capital extranjero representa una parte menor de las inversiones totales en este sector, estimándose en 12% de la capacidad de procesamiento observada en el año 2007 [Nastari (2007)].

Es importante observar que la expansión de la producción de bioetanol y azúcar en las últimas décadas ocurrió no sólo por el aumento del área cultivada, sino también por las significativas ganancias de productividad en las fases agrícola e industrial, que durante las últimas tres décadas presentaron incrementos anuales acumulados de 1,4% y 1,6%, respectivamente, y resultaron en una tasa de crecimiento anual del 3,1% en la producción de bioetanol por hectárea cultivada, según se presentó en el Gráfico 22, como valores medios para todas las unidades productoras brasileñas. Los datos sobre el área plantada y la producción de caña se tomaron del Ministerio de la Agricultura, Ganadería y Abastecimiento [Mapa (2007)] y la producción de bioetanol se obtuvo de las estadísticas de la Unión de la Industria de caña de azúcar [Unica (2008)]. Gracias a estas ganancias de productividad, el área actualmente dedicada al cultivo de la caña para producción de bioetanol, cerca de 3,5 millones de hectáreas, es un 38% del área que sería necesaria, considerando la producción actual y la productividad agroindustrial observada al inicio del Proálcool, en 1975. Esa notable ganancia de productividad, que multiplicó por 2,6 el volumen de bioetanol producido por área cultivada, se consiguió debido a la continua incorporación de nuevas tecnologías, como se comentará en la próxima sección.

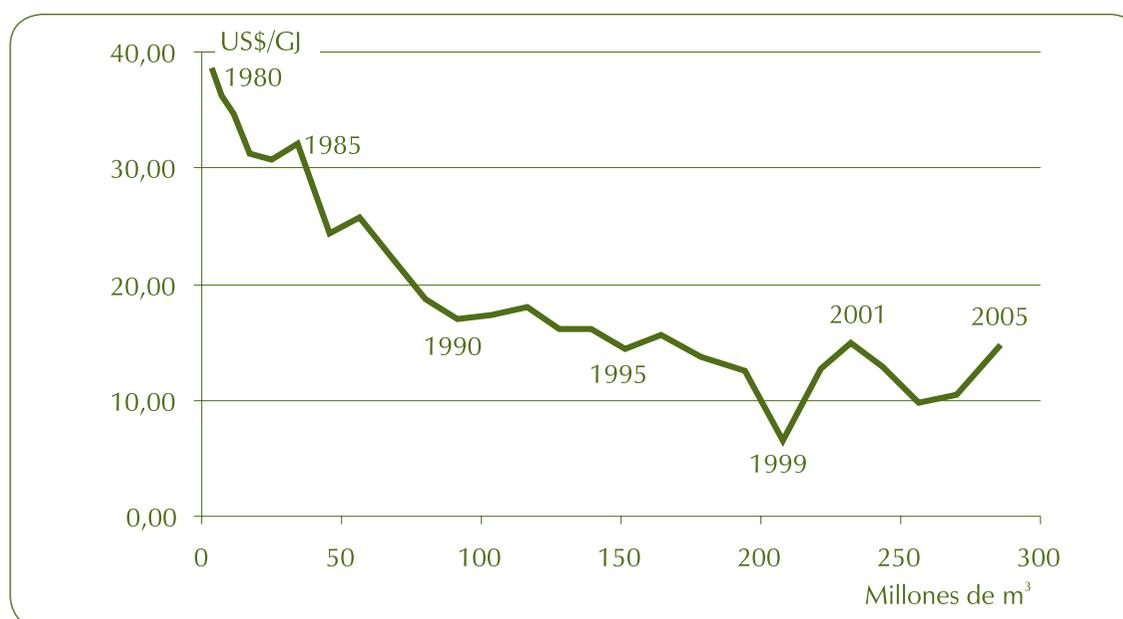
Gráfico 22 – Evolución de la productividad agrícola, industrial y agroindustrial de los ingenios de azúcar y etanol en Brasil



Fuente: Elaborado según datos de Mapa (2007) y Unica (2008).

Como consecuencia directa de la evolución de la productividad, se observó una progresiva reducción de los costos, que se reflejó en los valores recibidos por los productores, mostrados en el Gráfico 23, a menudo denominada *curva de aprendizaje*, pues evidencia claramente un proceso de aprendizaje y consolidación, similar al presentado por otras tecnologías energéticas innovadoras, como la energía eólica [Goldemberg et al (2004)]. En esta curva, el eje de las abscisas corresponde a la producción acumulada de bioetanol en las plantas brasileñas, mostrando cómo la experiencia y las ganancias de escala se tradujeron en una progresiva caída de los precios (en dólares estadounidenses a precios de 2002), con una reducción anual acumulada del 1,9% en los últimos 25 años. Un aspecto relevante en este gráfico es la tendencia asintótica de los precios, que se mantienen prácticamente constantes en los últimos diez años, indicando una madurez en el marco de las tecnologías convencionales.

Gráfico 23 – Evolución de los precios pagados a los productores de etanol en Brasil



Fuente: Adaptado de Goldemberg et al. (2005).

Según la misma lógica de crecimiento con ganancias de productividad y eficiencia, la evolución del segmento sucroalcoholero muestra formación de consorcios y grupos de unidades productivas (*clusters*) como recurso de racionalización de los costos, en especial en el caso de los componentes asociados a la adopción de nuevas tecnologías. Además, el sector está ampliando las escalas de producción de las plantas y asegurando la ocupación estratégica de áreas agrícolas contiguas [CGEE (2005)]. En este sentido, es notable el crecimiento de la capacidad unitaria de procesamiento de las nuevas unidades, que, aun alcanzando más de siete millones de toneladas de caña por año (en las mayores plantas), pueden mantener el costo de transporte de la caña en niveles competitivos, por medio del uso de sistemas eficientes y mayor cultivo de caña en las áreas próximas a la unidad industrial. Es interesante constatar que

estas unidades agroindustriales de mayor capacidad son comparables, en términos energéticos, a una refinería de petróleo con 35 mil barriles diarios de capacidad de procesamiento, o sea, una magnitud muy inferior a la observada en la actual industria petrolera.

En las páginas finales de este trabajo hay anexos con series históricas de datos para la producción de bioetanol (anhidro e hidratado), producción y área cosechada de caña (incluso para los principales estados productores) y precios pagados a los productores de bioetanol.

6.3 Investigación y desarrollo tecnológico

Durante la expansión de la producción de bioetanol de las plantas brasileñas, presentada en la sección anterior, la incorporación de procesos innovadores y el desarrollo tecnológico cumplieron un rol esencial, con incremento de la eficiencia en la producción y progresiva reducción de los impactos ambientales. Del mismo modo, las nuevas posibilidades de producción bioenergética a partir de caña de azúcar, tales como el empleo de subproductos lignocelulósicos para la producción de bioetanol y electricidad, dependen mucho de procesos que aún se encuentran en fase de desarrollo.

En ese sentido, fue y sigue siendo importante la existencia de instituciones públicas, nacionales y estatales, así como de empresas privadas preocupadas por aportar conocimiento a la cadena productiva del bioetanol de caña de azúcar, en particular en la etapa agrícola, involucrando mejoras genéticas, mecanización agrícola, gestión empresarial moderna, control biológico de plagas, reciclaje de efluentes y prácticas agrícolas conservacionistas de mayor desempeño [CGEE (2005)]. La mayoría de estas instituciones se localizan en el Estado de São Paulo, en donde se produce y procesa la mayor parte de la caña de azúcar del Brasil y en donde se ubica también el principal complejo universitario brasileño, responsable por cerca de la mitad de los trabajos científicos producidos en el país anualmente. Se produce así, en el mismo espacio, una interesante sinergia entre las necesidades de apoyo tecnológico y las disponibilidades de recursos humanos capacitados para acometer esa tarea, con el gobierno provincial paulista y el sector privado actuando como los mayores promotores de la generación y la introducción de innovaciones en la agroindustria.

Como ejemplos de institutos paulistas activos en tecnología de producción agroindustrial y uso de bioetanol de caña de azúcar, financiados por el gobierno Estatal, se pueden citar los siguientes: Instituto Agronómico de Campinas (IAC), Instituto de Investigaciones Tecnológicas (IPT), Instituto de Tecnología de Alimentos (ITAL), Compañía de Tecnología de Saneamiento Ambiental (Cetesb), e Instituto Biológico. A ellos se agregan las tres universidades públicas del Estado de São Paulo: la Universidad de São Paulo (USP), donde se encuentra la Escuela de Agronomía Luiz de Queiroz (ESALQ), tradicionalmente activa en tecnología de caña; la Universidad Provincial de Campinas (Unicamp) y la Universidad Provincial Paulista Julio de Mesquita Filho (Unesp), con varios cursos y grupos de investigaciones relacionados con la bioenergía de la caña de azúcar.

La más antigua de estas instituciones, el AIC, con estaciones experimentales en varias regiones del Estado, comenzó a trabajar con caña en el año 1892. En la última década ha fortalecido su actuación en este cultivo, para lo cual ha sido fundamental su asociación con empresas privadas. Desde 1994 desarrolla un activo programa de mejoramiento genético de variedades de caña, el ProCana, que periódicamente lanza nuevas variedades e introduce nuevos métodos de manejo de las plantaciones [Landell (2003)]. Este programa introdujo, con buenos resultados, prácticas innovadoras y eficientes en la gestión de sus actividades, que presentan un impacto económico 13 veces superior a las inversiones [Hasegawa y Furtado (2006)].

En el sector privado destaca el Centro de Tecnología de caña (CTC), creado en el año 1970 como Centro de Tecnología Copersucar y, que a partir de 2005 fue separado de esa cooperativa de productores de azúcar y bioetanol, pasando a organizarse como una asociación civil de derecho privado, sin fines de lucro. El CTC tiene actualmente como socios a 174 plantas y asociaciones de proveedores de caña, los cuales son responsables del 60% de la caña producida en Brasil, lo que le permite ejecutar un presupuesto anual de R\$ 45 millones, con un equipo de más de 300 investigadores [Furtado et al. (2008)]. Aunque, en la actualidad, sus trabajos en el área agrícola sean más importantes – con más de 70 variedades de caña lanzadas (cañas SP y CTC), cultivadas en el 43% del área destinada a la caña en el país – el CTC actúa en toda la cadena productiva de la caña de azúcar, en temas como administración rural, mejoramiento de variedades, fitosanidad, sistemas de plantación y cosecha, procesos de extracción y fermentación y sistemas de energía para las plantas de azúcar y bioetanol, habiendo sido la principal base de innovaciones para las plantas paulistas y un importante soporte técnico en temas agrícolas e industriales. En el ámbito de la biotecnología de la caña, el CTC desarrolla investigaciones desde 1990. El Centro ha sido pionero en la creación de variedades transgénicas de caña de azúcar en Brasil, liderando desde 1997 la constitución del Consorcio Internacional de Biotecnología de Caña de Azúcar (ICSB), entidad que hoy congrega 17 instituciones de 12 países productores de caña. Recientemente se instalaron unidades de investigación del CTC en Pernambuco y Alagoas, dedicadas al desarrollo de variedades para esos contextos [CTC (2008)]. En síntesis, el CTC ha sido líder en la introducción de innovaciones en la agroindustria sucroalcoholera y el mayor responsable de la notable ganancia de eficiencia observada en la producción de bioetanol durante las últimas décadas.

En el marco de las instituciones estatales, cabe destacar la Fundación de Apoyo a la Investigación del Estado de São Paulo (Fapesp), que ha desempeñado un rol muy importante en el fomento de las actividades de investigación y desarrollo, con un volumen importante de recursos asignados a más de una centena de estudios e investigaciones desarrollados por la comunidad académica y las empresas del sector, en temas básicos y aplicados [Fapesp (2007)]. Como ejemplos de las iniciativas recientes de la Fapesp junto con empresas privadas — que aportan la mitad de los recursos disponibles para el desarrollo de estudios por parte la comunidad científica —, los convenios firmados con Dedini Indústrias de Base y Braskem contemplan, respectivamente, R\$ 100 millones para proyectos de investigación en tecnologías de fabricación de bioetanol y R\$ 50 millones para estudios de procesos de síntesis con base en materias primas renovables derivadas de azúcares, bioetanol y otros productos de

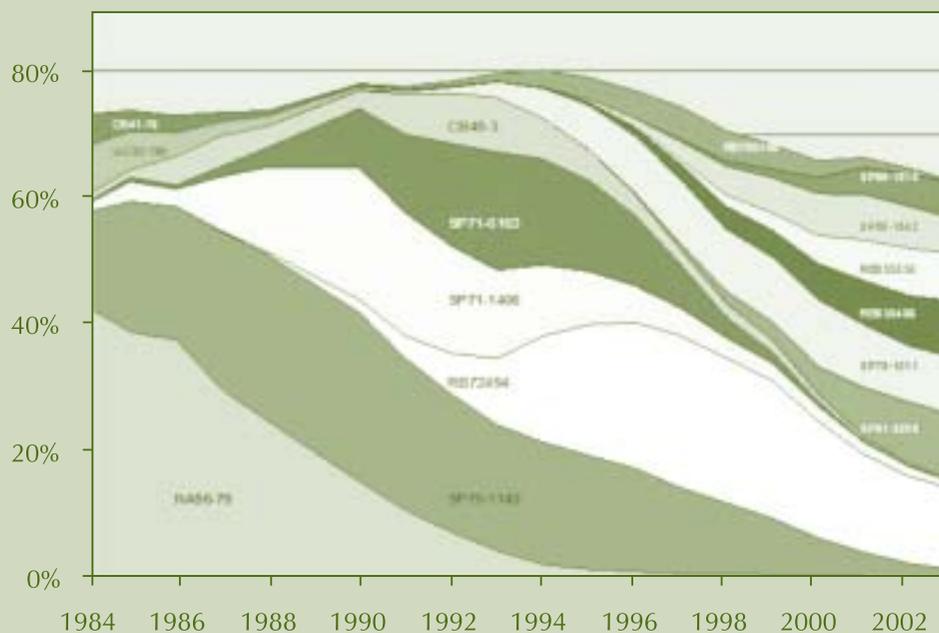
la cadena de los biocombustibles, con énfasis en los “polímeros verdes”. Además, la Fapesp financia el Programa Directrices de Políticas Públicas para la Agroindustria de la caña del Estado de São Paulo, orientado a la definición de subsidios a las acciones del gobierno en ese campo [Agencia Fapesp (2008)].

Vinculada al Gobierno Federal y ubicada en una tradicional región productora de caña, la Universidad Federal de São Carlos (UFSCar) cumple un rol importante en el desarrollo tecnológico de la agroindustria del bioetanol, especialmente en su etapa agrícola. En el año 1990, el Centro de Ciencias Agrarias de esta universidad creó el Programa Nacional de Mejoramiento de la caña de azúcar (Planalsucar), vinculado al antiguo Instituto del Azúcar y del Alcohol, que llegó a tener 30 estaciones experimentales en todo el país, contribuyendo de modo importante a mejorar la productividad de la caña en los estados del nordeste, particularmente en Alagoas [Furtado et al. (2008)]. A partir de la base de recursos humanos e infraestructura del Planalsucar, y para continuar las investigaciones de mejoramiento genético de la caña, se creó en el año 1991 la Red Interuniversitaria para el Desarrollo del Sector Sucroalcoholero (Ridesa), que involucra actualmente cerca de 140 investigadores de nueve universidades federales (Universidades de São Carlos, Paraná, Viçosa, Rural de Rio de Janeiro, Sergipe, Alagoas y Rural de Pernambuco, Goiás y Mato Grosso) cercanas a las antiguas estaciones experimentales del Planalsucar. Conducido con éxito, el programa ha lanzado, desde su formación, 65 cultivares (cañas RB), responsables del 57% del área sembrada con caña en Brasil [Ridesa (2008)]. Además del apoyo del Ministerio de Ciencia y Tecnología, que le aportó R\$ 1,8 millones en el año 2006, Ridesa cuenta con 130 empresas asociadas, que contribuyen con recursos y disfrutan los resultados [Inovação Unicamp (2007)].

Mejoramiento genético y disponibilidad de cultivares

La sanidad vegetal de las plantaciones de caña implica la periódica renovación y la diversidad de las variedades utilizadas, asegurando el mantenimiento de la productividad y la resistencia a enfermedades y plagas, que en condiciones de monocultivo pueden ser bastante dañinas, además de las características de precocidad o maduración tardía, adaptación al corte mecanizado y resistencia a determinadas condiciones climáticas, entre otras. En este sentido, es ejemplar cómo la tecnología agronómica ha venido apoyando la ampliación de la base de germoplasma de la caña y la diversificación de variedades utilizadas por la agroindustria brasileña, por medio de cuatro programas de mejoramiento de caña, siendo dos de ellos, privados. Es importante destacar que, con la Ley 9.456/1997 – Ley de los cultivares – las empresas y los grupos de investigación pueden cobrarle a los productores de caña por el uso de las variedades desarrolladas. Cada año, cerca de seis nuevas variedades se lanzan al mercado, haciendo que en la actualidad se cultiven cerca de 500 variedades diferentes. Entre ellas, la más utilizada ocupa el 12,6% del área plantada, como se puede observar en la Figura 25.

Figura 25 - Ocupación porcentual de las principales variedades de caña de azúcar en Brasil de 1984 a 2003



Fuente: Burnquist y Landell (2005).

En un programa de mejoramiento genético de la caña de azúcar, el punto de partida es el banco de germoplasma, que reúne millares de fenotipos, incluyendo las variedades utilizadas en el país, otras especies relacionadas al género *Saccharum* y variedades importadas de diferentes regiones cañeras del mundo. Después de obtenidas por medio de cruces preestablecidos por los investigadores, las semillas son enviadas a los laboratorios y a las estaciones experimentales, donde se producen las plántulas que, una vez transplantadas en el campo, pasan por sucesivas fases de selección durante tres a cuatro años, eligiéndose algunas centenas de clones a partir de millones de plántulas. Los clones seleccionados son, entonces, cultivados en pruebas de larga duración. Normalmente, el lanzamiento de nuevas variedades ocurre después de cerca de 13 años de innumerables evaluaciones de los clones por medio de experimentos, observándose su reacción a las enfermedades y plagas y la productividad en diferentes ambientes de producción [Ridesa (2008)].

En base al secuenciamiento de los 50 mil genes de la caña, desarrollado entre 1988 y 2001 en el Proyecto Genoma caña de azúcar, patrocinado por la Fapesp, diversos grupos brasileños vienen trabajando en métodos biotecnológicos avanzados para definir más rápidamente los clones con mejores condiciones en términos de resistencia a enfermedades, precocidad, sacarosa, biomasa total, etc. Sin embargo, además de las dificultades técnicas, estos estudios dependen de autorizaciones de larga tramitación en la Comisión Técnica Nacional de Bioseguridad, del Ministerio de Ciencia y Tecnología [Burnquist y Landell (2005)].

Entre las instituciones nacionales ubicadas en São Paulo, también se deben mencionar varias unidades de la Empresa Brasileña de Investigación Agropecuaria (Embrapa), en especial: Embrapa Medio Ambiente, en Jaguariúna, enfocada en temas asociados a la rehabilitación de áreas degradadas, uso sostenible de los recursos hídricos y control biológico de plagas y enfermedades; Embrapa Monitoreo por Satélite y Embrapa Informática Agropecuaria, ambas en Campinas, las cuales trabajan con aplicaciones de sensores remotos, geoprocésamiento e informática, todos con alguna actividad relacionada a la agroindustria de caña. Además, con la creación, en el año 2006, de Embrapa Agroenergía, con sede en Brasília, esta institución se involucrará más con la temática del bioetanol y la bioelectricidad de caña de azúcar.

Finalmente, pero no menos importante, entre las empresas privadas que actúan en el ámbito de la investigación y el desarrollo tecnológico en este campo, se deben citar también a CanaVialis y Allelyx, localizadas en Campinas y apoyadas por el fondo de inversiones Votorantim Ventures. Según estas empresas, ellas invierten cerca de R\$ 70 millones por año en investigaciones, destacando un programa de mejora de variedades que usa la técnica de la transgenia, mediante la cual se insertan genes de individuos diferentes en el genoma de la caña, para obtener variedades más productivas y más resistentes a enfermedades y a sequías. Para desarrollar sus actividades y cumplir con los contratos firmados con 34 plantas, CanaVialis posee tres estaciones experimentales certificadas por la Comisión Técnica Nacional de Bioseguridad (CTNBio). Conjuntamente, estas empresas cuentan con un equipo de más de 150 investigadores y se dedican a otras aplicaciones de la biotecnología en la agroindustria de la caña, como los marcadores moleculares y sistemas avanzados de gestión varietal, con evaluación de la vulnerabilidad genética [Furtado et al. (2008) y CanaVialis (2008)].

Durante las últimas décadas, esa gran base tecnológica actuó intensamente en el desarrollo de procesos, equipos y sistemas, y fue realimentándose y motivando sus líneas de estudios e investigaciones en base a la realidad tangible e inmediata de la agroindustria. En este sentido, es difícil afirmar cuál fue el factor desencadenador de esta creciente dinámica innovadora, pues, en realidad, ocurrió un proceso paralelo y simultáneo de generación y aplicación de valores, incluyendo más conocimiento aplicado, mejores tecnologías, mayor eficiencia, mayores ganancias, mejores perspectivas y motivación empresarial e institucional. Confirmando esta visión, en la Tabla 26 se presenta una síntesis de los resultados alcanzados y de las perspectivas de nuevos avances, en términos de productividad agrícola (producción anual de caña por hectárea plantada) e industrial (producción de bioetanol por tonelada de caña procesada). En la Tabla 27 se detallan los procesos en los cuales se pretende mejorar la productividad industrial.

Tabla 26 – Impacto de la introducción de nuevas tecnologías en la producción de bioetanol

Período		Productividad		
		Agrícola (t/ha)	Industrial (litro/t)	Agroindustrial (litro/ha)
1977–1978	Fase inicial del Programa Nacional del Alcohol Bajas eficiencias en el proceso industrial y en la producción agrícola	65	70	4.550
1987–1988	Consolidación del Programa Nacional del Alcohol La productividad agrícola y la productividad industrial aumentan significativamente	75	76	5.700
Situación actual	Proceso de producción de bioetanol operando con la mejor tecnología disponible	85	80	6.800
2005–2010	Primera fase de optimización de los procesos	81	86,2	6.900
2010–2015	Segunda fase de optimización de los procesos	83	87,7	7.020
2015–2020	Tercera fase de optimización de los procesos	84	89,5	7.160

Fuente: CGEE (2006).

Tabla 27 – Expectativas de ganancias de eficiencia en procesos de producción de bioetanol (En %)

Situación (según Tabla 26)	Pérdidas en el lavado de caña	Eficiencia de extracción	Pérdidas en el tratamiento del jugo	Rendimiento en la fermentación	Pérdidas en la destilación y vinaza
Situación actual	0,50	96,0	0,75	90,3	0,50
Primera fase de optimización	0,40	96,5	0,75	91,0	0,50
Segunda fase de optimización	0,30	97,0	0,50	91,5	0,25
Tercera fase de optimización	0,25	98,0	0,35	92,0	0,20

Fuente: CGEE (2006).

Como se puede observar en las Tablas 26 y 27, el incremento previsto para la productividad agroindustrial, sin considerar la introducción de otras rutas de producción, como el bioetanol celulósico, deberá permitir, en los próximos años, una reducción de 3,4% en la superficie plantada por unidad de bioetanol producido, gracias a la investigación y al desarrollo tecno-

lógico. Si se considera también la producción de bioetanol a partir de residuos celulósicos, la productividad podría alcanzar, en este mismo período, 10.400 litros de bioetanol por hectárea [CGEE (2005)], correspondiendo a una reducción del 33% del área plantada por unidad de bioetanol producido.

Mientras que los resultados del perfeccionamiento de los procesos en las áreas industrial y administrativa se pueden reproducir, en general, en diferentes regiones, en el caso de la producción de la caña las variables edafoclimáticas presentan una influencia decisiva y una mayor especificidad regional. Ello impone el desarrollo descentralizado de programas de mejoramiento e impulsa la cooperación entre empresas y el intercambio entre instituciones para disminuir los costos. Además, vale la pena comentar cómo esas innovaciones se han difundido entre las plantas de azúcar y bioetanol. En ese sentido, un detallado estudio sobre la evolución de la agroindustria de caña paranaense entre 1990 y 2005 hizo evidente la gran importancia de la interacción directa entre los institutos y proveedores de tecnología y las empresas usuarias, siendo el *learning-by-interacting* el tipo de aprendizaje predominante en este sector [Rissardi Jr. y Shikida (2007)]. Esta constatación valora aún más la existencia de centros tecnológicos regionales o descentralizados.

Por lo tanto, es necesario reforzar los vínculos ya existentes entre las organizaciones en los distintos países con potencial real para la producción eficiente de bioetanol, de modo que se establezcan las bases correctas para el adecuado desarrollo de sus agroindustrias bioenergéticas. En América Latina, entre las instituciones con bases importantes para la promoción de la diversidad y de la productividad en la agricultura de caña, se pueden citar las siguientes: el Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar (Cengicaña), el Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia (Cenicaña), la Dirección de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar (Dieca), en Costa Rica, y West Indies Central Sugar Cane Breeding Station, en Barbados, esta última estación con un conocido banco de germoplasma para todo el Caribe.

También, con el objetivo de racionalizar las actividades de investigación y desarrollo en bioetanol, es importante establecer prioridades. Para las condiciones del centro sur brasileño [Macedo y Horta Nogueira (2007) y CGEE (2007b)], los temas considerados de mayor relevancia son los siguientes:

- a. procesos para recuperación y uso de la paja y bagazo excedentes;
- b. desarrollo de variedades transgénicas de caña;
- c. selección de cultivares (mejoramiento convencional para nuevas áreas y adopción del concepto de la caña energética, mediante el cual se busca maximizar el resultado global que se puede conseguir mediante el procesamiento del azúcar y de la fibra para producción de energía);
- d. desarrollo de equipos y procesos para la extracción del jugo, tratamiento, fermentación y separación del bioetanol;

e. sistemas para agricultura de precisión, en los cuales las intervenciones en el cultivo son definidas con la ayuda de técnicas de geoprocésamiento y sistemas de posicionamiento global (GPS – *global positioning systems*);

f. controles biológicos de plagas y enfermedades;

g. prácticas de cultivo de la caña que faciliten la cosecha mecánica;

h. nuevos productos y procesos de sucroquímica y alcoholquímica;

i. uso final del bioetanol (perfeccionamiento en la tecnología de motores bi-combustibles y celdas de combustible operando con bioetanol).

La experiencia brasileña, y en particular la del Estado de São Paulo, en el financiamiento de las actividades de investigación y desarrollo en la agroindustria del etanol, destacan la necesidad de tomar las siguientes iniciativas, además de proveer los recursos necesarios: estructurar un plan de acción con objetivos y competencias claras, estableciendo una gestión coordinada de las distintas actividades y contemplando mecanismos de análisis y divulgación de los resultados; reforzar los programas de capacitación de personal, especialmente a nivel de postgrado; promover programas de unidades piloto semicomerciales y unidades de demostración en las tecnologías nuevas; y finalmente, valorarizar las estructuras existentes, con el objetivo de consolidar los centros activos en la actualidad (incorporando, en el caso de que sea necesario, nuevos laboratorios y equipos), además de promover y organizar la capacitación disponible.

Una de las posibles formas que se ha sugerido para articular el financiamiento de las actividades de investigación y desarrollo en el ámbito de la agroindustria energética es la constitución de un Fondo de Fomento a la Investigación (CT-Etanol), con el objetivo específico de financiar estudios básicos y aplicados en toda la cadena productiva de los biocombustibles. Con eso, sería posible replicar los buenos resultados obtenidos con los Fondos Sectoriales, en que una parte de los recursos generados en un determinado sector energético (petróleo, energía eléctrica) es utilizada para la generación y agregación de conocimiento en este mismo sector. Se estima que con la aplicación de una alícuota de 0,5% sobre el ingreso líquido de la venta del bioetanol se podrían recaudar cerca de R\$ 185 millones, que ayudarían a asegurar el dinamismo tecnológico de este sector [Cortez (2007)].

Mientras se preparaba este libro, el Ministerio de la Ciencia y Tecnología anunció la creación del Centro de Ciencia y Tecnología del Bioetanol (CTBE), el cual deberá funcionar en el Polo Tecnológico de Campinas, dedicándose al amplio espectro de las tecnologías de interés para la conversión eficiente de la biomasa en energía. Este centro, actualmente en fase de estructuración, incluirá laboratorios para la investigación básica y una planta piloto, previéndose un énfasis mayor en los estudios básicos del fenómeno de la fotosíntesis, en sistemas de producción de biomasa y en procesos avanzados para la producción de biocombustibles, como la hidrólisis.



Capítulo 7

Sostenibilidad del bioetanol de caña de azúcar: la experiencia brasileña

Entre los aspectos de los sistemas energéticos a los que se está prestando mayor atención se encuentran su condición de renovables y sostenibles. Así como lo definió la Comisión Brundtland en los años ochenta, se espera que los sistemas energéticos sean capaces de “satisfacer las necesidades de las generaciones actuales sin comprometer las posibilidades de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades, buscando el equilibrio entre los aspectos económicos, sociales y ambientales del desarrollo y atendiendo las necesidades de los más pobres” [United Nations (1987)]. Sin embargo, determinar la sostenibilidad de un sistema energético no es una tarea simple y depende, no sólo del sector energético, sino, fundamentalmente, del contexto de su producción y utilización. En ese sentido, generalmente resulta más simple demostrar la falta de sostenibilidad de un sistema energético (no renovable, contaminante etc.) que asegurar la sostenibilidad de sistemas basados en energías renovables, como es el caso de las bioenergías.

El debate sobre la sostenibilidad de las bioenergías es muy actual y, muchas veces se polariza entre visiones utilitaristas y conservadoras. Desde hace milenios, las sociedades humanas aprovecharon los flujos energéticos asociados con la producción vegetal en diferentes ecosistemas y por ello debe considerarse como una alternativa energética. Sin embargo esta alternativa tiene que ser analizada y fomentada en los contextos apropiados. Este capítulo está dedicado a la producción de bioetanol de caña de azúcar, bajo el prisma de la sostenibilidad, definida como la posibilidad de que los sistemas bioenergéticos mantengan su producción a largo plazo, sin que los recursos que le dan origen (la biodiversidad, la fertilidad del suelo y los recursos hídricos) disminuyan. Este enfoque se basa en una de las definiciones clásicas de sostenibilidad: “condición en que la

producción puede ser mantenida indefinidamente sin afectar el stock de capital, incluyendo en este último el capital natural” [Goodland (1992)].

Después de la Conferencia de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y el Desarrollo, la Cumbre de la Tierra, realizada en Rio de Janeiro en 1992, la sostenibilidad pasó a ser considerada a partir de tres pilares – ambiental, social y económico -, se transformó en un concepto de uso amplio y fue siempre mencionado en los debates sobre las perspectivas de crecimiento de los países. De esta manera, el presente capítulo abordará la sostenibilidad desde una perspectiva ambiental local y global y serán analizados algunos aspectos relacionados con la viabilidad económica y social de este biocombustible. La referencia siempre será el caso brasileño, un modelo que, teóricamente, puede ser aplicado en otros países que dispongan de tierras de cultivo y condiciones edafoclimáticas similares. También se discutirán algunos temas relacionados a la problemática de la sostenibilidad, como pueden ser el uso del suelo, la zonificación agroecológica para la plantación de la caña de azúcar en Brasil y los avances y las perspectivas relacionadas con la certificación de los biocombustibles.

7.1 Ambiente y energía de la caña de azúcar

El primer aspecto a analizar será el de las implicaciones ambientales de la producción de bioetanol. Debe existir legislación que oriente a los productores acerca de las mejores prácticas y que reprima las acciones que degraden el medio ambiente. En este sentido, para la instalación y operación de un ingenio azucarero y de bioetanol en Brasil, es necesario, según los términos de la Resolución Conama 237/1997, que se cumplan adecuadamente las tres fases de licenciamiento ambiental, caracterizadas por la obtención de las siguientes licencias:

- a. Licencia Previa (LP) – aprueba la ubicación y el concepto del proyecto, y establece los requisitos básicos y las condiciones que deberán ser cumplidas en las fases siguientes.
- b. Licencia de Instalación (LI) – autoriza la instalación e incluye medidas de control ambiental.
- c. Licencia de Operación (LO) – autoriza la operación después del cumplimiento de las exigencias establecidas en las licencias anteriores, debiendo ser renovada periódicamente.

Los documentos básicos para este proceso de licenciamiento son el Estudio de Impacto Ambiental y el respectivo Reporte de Impacto sobre el Medio Ambiente (EIA/Rima). Son obligatorias la realización de una audiencia pública para su presentación y la definición de una compensación ambiental, como la plantación de especies nativas o el establecimiento de una reserva natural permanente. Las exigencias presentadas para la realización de estos estudios y los requisitos a ser cumplidos son establecidos por la legislación vigente, en función de la capacidad de procesamiento de las unidades agroindustriales. En los casos de proyectos menores o alteración de procesos que no causen impactos ambientales, como la ampliación de sistemas de cogeneración, se puede exigir un Reporte Ambiental Preliminar (RAP) en un proceso simplificado.

A continuación se presentan los impactos ambientales más importantes en la producción de caña y bioetanol, como las emisiones de efecto global (gases de efecto invernadero) y local (especialmente asociadas a la quema previa a la cosecha de la caña), el uso de agua y la disposición de los efluentes (inclusive la vinaza), el uso de agroquímicos, la erosión y la protección de la fertilidad del suelo y de la biodiversidad, siempre teniendo en cuenta la realidad de la agroindustria brasileña de la caña.

Emisiones de gases de impacto global

A causa del elevado rendimiento fotosintético observado en la producción de caña de azúcar y del eficiente proceso para su conversión en biocombustible, el uso de bioetanol reduce las emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con el combustible fósil (gasolina).

Esta contribución en la mitigación del cambio climático es, posiblemente, uno de los aspectos más importantes asociados al bioetanol de caña de azúcar. Este tema se presentó detalladamente en la Sección 3.5 (Productividad, emisiones y balances energéticos), en el cual no sólo se pone de manifiesto el impacto positivo que ofrece el etanol de caña, sino también se observa cómo las demás materias primas son poco eficaces en este sentido.

En la Tabla 28, se muestra una síntesis del balance de carbono, con las emisiones de dióxido de carbono en la producción y en el uso del bioetanol, sin tomar en cuenta otros gases ni efectos de segundo orden, analizando todas las operaciones de producción y uso en las condiciones típicas observadas en las agroindustrias del Centro Sur brasileño. Los valores presentados en esta tabla se calcularon teniendo en cuenta la composición de varios productos de la caña y los balances de masa observados, actualmente, en la agroindustria. Estos valores consideran un procesamiento de 12,5 toneladas de caña para producir mil litros de bioetanol. Con los avances tecnológicos previstos, estos resultados deberán mejorar significativamente en el futuro.

Tabla 28 – Balance resumido de las emisiones de CO₂ en la agroindustria del bioetanol de caña de azúcar en el centro sur brasileño (kg /mil litros de bioetanol)

Etapa	Absorción de CO ₂ en la fotosíntesis	Liberación de CO ₂	
		Fósil	Fotosintético
Plantación		173	
Crecimiento	7.464		
Cosecha y transporte		88	2.852
Fabricación de etanol		48	3.092
Uso de etanol			1.520
Total	7.464	309	7.464

Fuente: Elaboración de Luiz Augusto Horta Nogueira.

Como se puede observar, el carbono liberado a la atmósfera corresponde a la suma del carbono de origen fotosintético, absorbido durante el crecimiento de la caña y después liberado en cuatro etapas – en la quema de la paja, en la fermentación (conversión de los azúcares en bioetanol), en la quema del bagazo en las calderas y en la combustión del bioetanol en los motores -, y del carbono de origen fósil, que corresponde a un aporte neto a la atmósfera, resultante a su vez de las operaciones agrícolas e industriales y de la producción de insumos y equipos. De este modo, sólo el carbono de origen fósil debe ser considerado, ya que el carbono fotosintético liberado corresponde al absorbido por la caña. Comparando el aporte neto de las emisiones fósiles, del orden de los 309 kg de CO₂ por mil litros de bioetanol producido, con la emisión estimada para la gasolina, de 3.009 kg de CO₂ (incluyendo un aumento del 14% de las emisiones en la producción), y asumiendo idéntico desempeño en términos de uso final, resulta una reducción del orden del 90% en las emisiones de carbono. Estos valores no cambian sustancialmente cuando se consideran los efectos de segundo

orden, asociados a otros gases, además del dióxido de carbono, como se determinó en el tópico 3.5 anteriormente mencionado. En varios estudios se presentaron resultados similares que, respaldan las grandes ventajas ambientales del bioetanol de caña de azúcar en términos de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y consecuente mitigación del cambio climático [Concawe (2007), Esmap (2005) e IPCC (2008)].

Según la Comunicación Brasileña para la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático, con valores de 1994, la utilización de la energía de la caña redujo en un 13% las emisiones de carbono de todo el sector energético. En el caso de la producción de esa agroindustria en Brasil, en el año 2003, la sustitución de gasolina por etanol y la generación de energía con bagazo redujeron las emisiones de CO₂ equivalente a 27,5 millones y 5,7 millones de toneladas, respectivamente [Goldemberg et al. (2008)]. Como una referencia para cálculos, cada 100 millones de toneladas de caña destinadas a fines energéticos reducen la emisión de 12,6 millones de toneladas de CO₂ equivalente, considerando etanol, bagazo y el excedente adicional de energía eléctrica suministrada a la red [Unica (2007)].

Emisiones de gases de impacto local

En la producción del bioetanol, las emisiones de impacto local más preocupantes están asociadas, esencialmente, a la quema de la paja de caña previa a la cosecha y a las emisiones en las chimeneas de las calderas. La quema de la paja, que aumenta la productividad de la cosecha, es considerada un problema ambiental que afecta, principalmente, las ciudades ubicadas en regiones de producción de caña. Por eso, los órganos públicos brasileños quieren restringir esta práctica, lo que implica, indirectamente, eliminar el corte manual, bastante difícil en el caso de la caña cruda, o sea, la caña sin quemar.

El mejor ejemplo de esta actitud existe en São Paulo, donde la *Lei Estadual* 11.241 (Ley Estatal), de 2002, estableció un cronograma para la cosecha de la caña cruda en todas las áreas mecanizables hasta el año 2021, permitiendo que las áreas restantes y menores de 150 hectáreas realicen quemas hasta el año 2031. Debido a las presiones de algunas entidades ambientalistas y de órganos públicos defensores de intereses civiles, un protocolo entre el gobierno provincial paulista y la agroindustria de la caña anticipó estos plazos para 2014 y 2017, respectivamente, con restricciones adicionales para la quema en áreas de expansión. En este sentido, la autorización para que 56 nuevas unidades productoras de etanol puedan operar en São Paulo a partir del año 2008, se condicionó a la adopción integral de la cosecha de caña cruda. Los resultados de este proceso se pusieron en evidencia mediante imágenes de satélite y muestran que la cosecha de caña sin quemar alcanzó un 47% del área cosechada en São Paulo, en la cosecha 2007/2008, evitando la emisión de 3.900 toneladas de material particulado [Cetesb (2008)]. En otros estados, como Goiás y Mato Grosso, se observan iniciativas similares, que establecen cronogramas para la eliminación de las quemas, pero aún no existen resultados medidos. Además de los aspectos ambientales, la posibilidad de utilizar la energía de la paja para la producción de energía eléctrica es un factor que incentiva la adopción de la cosecha de la caña cruda.

A partir de la introducción de calderas modernas en los ingenios, con menor exceso de aire y quemando bagazo a temperaturas de llama más elevadas, las concentraciones de óxidos de nitrógeno en los gases de chimenea alcanzaron niveles similares a los observados en otros sistemas térmicos de potencia y pasaron a ser controlados por órganos ambientales, de acuerdo con la legislación propia, que establece límites y penalidades para tales emisiones (Resolución Conama 382, de 2006). En este contexto, las emisiones de las calderas pueden ser, y efectivamente vienen siendo, disminuidas mediante sistemas convencionales de limpieza de los gases de chimenea, con resultados positivos. Por ello no parecen ser, en el caso de la agroindustria del bioetanol, un problema relevante.

Uso de recursos hídricos y disposición de efluentes

Desde el punto de vista de los recursos hídricos, las condiciones particularmente favorables en los países de las regiones tropicales húmedas, como es el caso brasileño, con régimen pluvial abundante y bien distribuido, permiten que la mayoría de los cultivos se desarrolle sin irrigación. En el caso brasileño, se estima que las áreas agrícolas irrigadas son 3,3 millones de hectáreas, cerca del 4% de la superficie cultivada. El volumen promedio de lluvia anual en el territorio brasileño es de 5740 km³, frente a un consumo estimado de 55 km³, o sea, inferior al 1% de las necesidades y en torno a 34 mil m³ de agua por habitante y año [Souza (2005a)]. No obstante, hay regiones brasileñas donde la disponibilidad anual es inferior a 1,5 mil m³ de agua por habitante, caracterizando una situación crítica de abastecimiento de agua. Por eso se implementó el sistema de otorgamiento y cobranza por el uso de agua por parte de los *Comitês de Bacia* (Comités de Cuenca), en los términos de la Ley 9.433/1997 (Ley de Aguas), que deberá estimular un uso más responsable y la reducción de las emisiones de contaminantes en los cuerpos hídricos, debido a la aplicación del principio “contaminador/pagador”.

Dependiendo del clima, el cultivo de la caña requiere de 1.500 mm a 2.500 mm de lámina de agua adecuadamente distribuidos (un período húmedo y caluroso para su crecimiento y un período seco para la maduración y la acumulación del azúcar) durante el ciclo vegetativo. En la región Centro Sur del Brasil prácticamente no se usa la irrigación en el cultivo de la caña. Se utiliza irrigación en la región Centro Oeste en los momentos más críticos y, de modo más frecuente, en la región Nordeste, bajo el concepto de “irrigación de salvación”, después de la plantación de la caña, para garantizar el brote en condiciones de déficit hídrico y como “irrigación suplementaria”, realizada con diferentes láminas de agua en las épocas más críticas del desarrollo del vegetal [Souza (2005a)]. Se cree que, a medida que áreas con menor disponibilidad hídrica pasen a ser ocupadas por plantaciones de caña, la irrigación podrá resultar interesante para mantener la productividad agrícola, debiendo en este caso ser realizada en el ámbito de la legislación vigente. Actualmente, según los criterios de Embrapa, las plantaciones de caña no presentan impactos en la calidad del agua [Rosseto (2004)].

En el ámbito del proceso industrial, además del volumen captado para el procesamiento de la caña, un volumen importante de agua entra en el ingenio con la propia caña, ya que el 70% del peso de las estacas está constituido por agua. Así, aunque se estime un consumo de

proceso del orden de 21 m³ por tonelada de caña procesada, la captación y las emisiones de agua son bastante inferiores. Con relación a los usos, el 87% del consumo de agua ocurre en cuatro procesos: lavado de caña, condensadores/inyectores múltiples en la evaporación y vacíos, enfriamiento de cubas y condensadores de alcohol. Con la racionalización del consumo de agua (reutilización y cierres de circuitos y algunos cambios de proceso, como la limpieza en seco y la reducción del lavado de la caña, en razón del corte mecanizado), la utilización de agua se vio reducida de modo significativo. Algunos estudios realizados en 1997 y 2005 muestran una reducción de la utilización promedio de 5 m³ a 1,83 m³ por tonelada de caña procesada, con expectativas de alcanzar, a mediano plazo, 1 m³ por tonelada de caña procesada [Elia Neto (2005)].

Los principales efluentes observados en la producción de bioetanol y sus sistemas de tratamiento se presentan en la Tabla 29. Una investigación realizada en 34 ingenios indicó que el tratamiento utilizado reduce la carga orgánica en un 98,40%, con un remanente de 0,199 kg DBO/t caña [Elia Neto (2005)]. La fertirrigación, mediante la cual se aplica la vinaza en las plantaciones de caña, es la principal forma de disposición final de la carga orgánica, con ventajas ambientales y económicas. Por su importancia, vale la pena analizar un poco más el uso de la vinaza.

Tabla 29 – Efluentes de la agroindustria del bioetanol

Efluente	Características	Tratamiento
Agua de lavado de caña	Medio potencial contaminador y alta concentración de sólidos	Decantación y lagunas de estabilización para el caso de lanzamientos en cuerpos de agua. En la reutilización, el tratamiento consiste en decantación y corrección de pH
Aguas de los inyectores múltiples y condensadores barométricos	Bajo potencial contaminador y altas temperaturas (~ 50° C).	Tanques aspersores o torres de refrigeración, con recirculación o lanzamiento
Aguas de refrigeración de cubas y de condensadores de alcohol	Alta temperatura (~ 50° C)	Torres de refrigeración o tanques aspersores para retorno o lanzamiento
Vinaza y aguas residuales	Gran volumen y carga orgánica elevada	Aplicación en la plantación de caña conjuntamente con las aguas residuales

Fuente: Elia Neto (2005).

La vinaza, producida a razón de 10,85 litros por litro de bioetanol, constituye el más importante efluente de la agroindustria de la caña. En su composición, presenta concentraciones elevadas de potasio (cerca de 2 kg por m³) y de materia orgánica, pero es relativamente pobre en los demás nutrientes. Cuando comenzó el programa *Proálcool*, la vinaza se arrojaba

directamente a los ríos, con graves problemas ambientales atenuados por el uso de cuencas de infiltración y resueltos a partir de 1978, con los sistemas de fertirrigación.

El área de cultivo de caña cubierta por fertirrigación depende de la topografía y de la distribución de tierras del ingenio - hay ingenios que aplican vinaza en el 70% de su área de cultivo y otros poseen valores bastante menores. Actualmente, se busca extender esta área cubierta por la vinaza para aumentar la productividad agrícola y reducir el uso de fertilizantes químicos, utilizando dosis cada vez menores, disminuyendo así los riesgos de salinización y contaminación de la napa freática [Souza (2005b)]. Entre los ingenios paulistas predominan los sistemas de bombeo y aspersión para la aplicación de vinaza, aunque también se emplean camiones tanque convencionales para su distribución.

Estudios de larga duración sobre los efectos de la aplicación de la vinaza en las plantaciones de caña que consideran el lixiviado de los nutrientes y la posibilidad de contaminación de aguas subterráneas, confirman los beneficios para las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, como elevación del pH, aumento de la capacidad de intercambio iónico y de la disponibilidad de ciertos nutrientes, mejora de la estructura del suelo y aumento en la retención de agua y en el desarrollo de la microflora y microfauna del suelo. En efecto, utilizada en tasas adecuadas, inferiores a 300 m³ por hectárea, respetando las características de los suelos en que se aplica y la ubicación de las nacientes de agua, la vinaza, además de suministrar agua y nutrientes, actúa como recuperadora de la fertilidad del suelo, aun en profundidad [Souza (2005b)]. En la actualidad se considera la vinaza como fertilizante orgánico por lo que se puede usar libremente en la producción de azúcar “orgánica”, en la que no pueden ser utilizados insumos químicos, tales como herbicidas, insecticidas y abonos minerales.

Algunas regiones del estado de São Paulo, tradicionales productoras de caña de azúcar se encuentran en áreas ambientalmente vulnerables, como puntos de recarga de importantes acuíferos paulistas. En estos casos, el uso intensivo y frecuente de vinaza podría ocasionar la contaminación de aguas subterráneas a largo plazo. Considerando tales condiciones, la legislación ambiental referente al uso de la vinaza está evolucionando. En 2005, la Secretaría de Medio Ambiente del estado de São Paulo divulgó una norma técnica sobre los criterios y proceso para aplicación, movimiento y disposición de la vinaza en suelo agrícola [SMA (2005)]. Esta norma estipula, principalmente, medidas de protección de las aguas superficiales y subterráneas, exigiendo impermeabilización de tanques de almacenaje y canales de distribución del residuo, lugares de aplicación y la dosis máxima de 185 kg de K₂O por hectárea, calculada en función de la concentración de potasio presente en la vinaza, limitando en un 5% la capacidad de intercambio de cationes del suelo ocupada por iones de potasio [Bertoncini (2008)]. Esa legislación es obligatoria en el estado de São Paulo y, en la preparación de otras normas de cuño ambiental, tiende a ser adoptada en el resto del país.

Independientemente de los resultados alcanzados con la fertirrigación, hay interés en aprovechar el contenido energético remanente de la vinaza, mediante su biodigestión y la producción de biogás. Otra línea de investigación es la concentración de la vinaza, por ejemplo, a través de la recirculación en la fermentación, combinada con la preconcentración del caldo o utilizando membranas,

apuntando a reducir su volumen y facilitar su transporte a distancias mayores [CGEE (2005)]. Ambas alternativas no alcanzaron aún indicadores positivos de viabilidad económica, como ya se observó en el Capítulo 4, pero con la evolución de los procesos pueden llegar a ser adoptados en el mediano plazo, especialmente en los lugares donde la topografía y las distancias dificultan mucho la fertirrigación.

Para tener una idea sobre la evolución de la agroindustria de la caña en el tratamiento y en la reducción del lanzamiento de sus efluentes en los cuerpos hídricos, un estudio de la Cetesb realizado en las 16 cuencas hidrográficas del estado de São Paulo donde existe producción de bioetanol, estimó una descarga potencial de 9.340 mil toneladas diarias de demanda bioquímica de oxígeno (DBO) asociada a los ingenios de azúcar y bioetanol y un lanzamiento efectivo de 100 mil toneladas, representando una disminución del 99% del potencial contaminante, evaluado por la carga orgánica [Moreira (2007)]. Naturalmente, estos interesantes resultados fueron controlados por la acción fiscalizadora, pero indican que el uso de tecnologías puede mitigar, de modo significativo, el impacto de los residuos líquidos en los cursos de agua.

Sin querer desmerecer los resultados alcanzados, en función de la magnitud del área ocupada y de la producción de bioetanol, se realizan, permanentemente, esfuerzos para mantener o reducir los impactos ambientales de estos efluentes. En este sentido, son interesantes las medidas adoptadas para la protección de los manantiales, especialmente con el progresivo abandono del cultivo de la caña en las denominadas Áreas de Preservación Permanente (APP), que representan un 8% del área cultivada, lo que permitirá su recuperación de modo progresivo o la recuperación con reforestación, principalmente en la vegetación ciliar, con efectos positivos relevantes sobre la biodiversidad [Ricci Jr. (2005a)].

Uso de agroquímicos

En la producción de caña de azúcar se usan regularmente productos químicos como insecticidas, fungicidas, herbicidas y agentes maduradores o retardadores de floración, en niveles considerados bajos en comparación con el promedio observado en otros cultivos comerciales de importancia.

Como se presenta en la Tabla 30 y de acuerdo al Sindicato Nacional de la Industria de Productos para Defensa Agrícola (Sindag), los valores de consumo de agroquímicos en los principales cultivos brasileños varían bastante dependiendo del cultivo. La caña de azúcar casi no requiere fungicidas y los insecticidas se usan en cantidades reducidas.

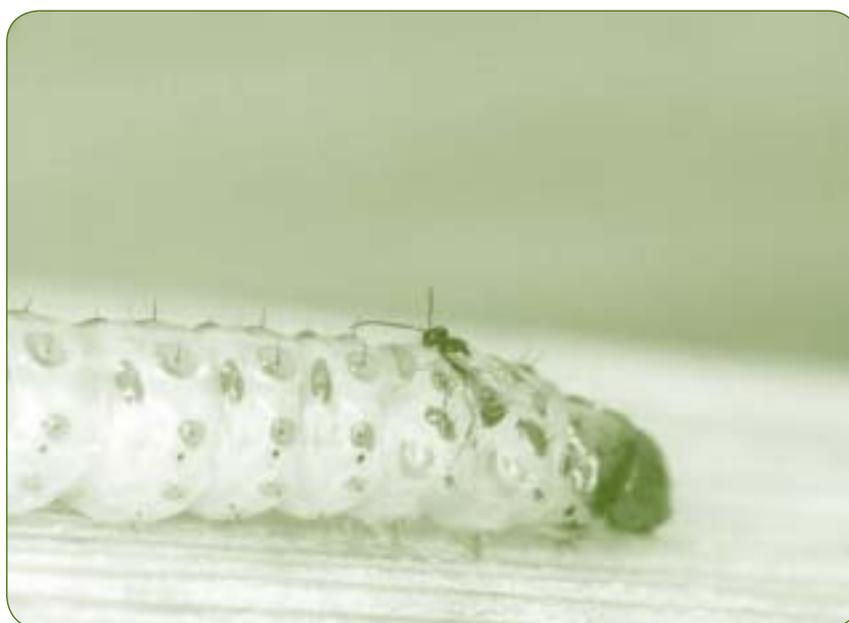
Se usan menos pesticidas en la caña debido a los procedimientos de combate a las plagas y enfermedades, gracias en parte a la selección de variedades resistentes obtenidas en programas de mejoramiento genético y principalmente por la adopción, con excelentes resultados, de métodos biológicos de control de las principales plagas de la caña. Por ejemplo, el barrenador de la caña de azúcar (*Diatraea saccharalis*), una especie de mariposa, se puede

combatir con la avispa *Cotesia flavipes*, y el salivazo de la caña de azúcar (*Mahanarva fimbriolata*) se controla mediante aplicaciones de hongos *Metarhizium anisopliae* [Arrigoni y Almeida (2005)].

Tabla 30 – Uso de agroquímicos en las principales plantaciones de Brasil (En kg de ingrediente activo por hectárea)

Producto	Año	Cultivo				
		Café	Caña de azúcar	Naranja	Maíz	Soya
Fungicida	1999	1,38	0,00	8,94	0,00	0,00
	2003	0,66	0,00	3,56	0,01	0,16
Insecticida	1999	0,91	0,06	1,06	0,12	0,39
	2003	0,26	0,12	0,72	0,18	0,46
Acaricida	1999	0,00	0,05	16,00	0,00	0,01
	2003	0,07	0,00	10,78	0,00	0,01
Otros	1999	0,06	0,03	0,28	0,05	0,52
	2003	0,14	0,04	1,97	0,09	0,51

Fuente: Arrigoni y Almeida (2005) y Ricci Jr. (2005b).



Larva del barrenador de la caña de azúcar (*Diatraea saccharalis*) y su parasitoide, la avispa *Cotesia flavipes*.

El control biológico emplea parasitoides o predadores para controlar, con alta especificidad y bajo impacto, plagas en la agricultura. Este método, en relación con el uso de insecticidas

convencionales, presenta ventajas económicas ya que reduce las aplicaciones indiscriminadas de productos químicos y mantiene las plagas en un nivel mínimo tolerable. La limitación de la quema de la caña podrá aumentar la necesidad del uso de estos controles alternativos para combatir al salivazo.

En el combate a las malezas la caña utiliza aún más herbicidas que el café o el maíz, pero menos que la citricultura, siendo, en este sentido, equivalente a la soya. Sin embargo, con la progresiva adopción de la cosecha de la caña cruda, la parte de la paja que permanece sobre el suelo promueve una supresión en la germinación y en la emergencia de plantas invasoras, determinando un consumo significativamente menor de herbicidas [Urquiaga et al. (1991)]. Sobre el uso de agroquímicos, es importante mencionar que la Ley 7.802/89 determina el uso del recetario agronómico, que define responsabilidades y procedimientos de aplicación y descarte de los envases.

Uso de fertilizantes

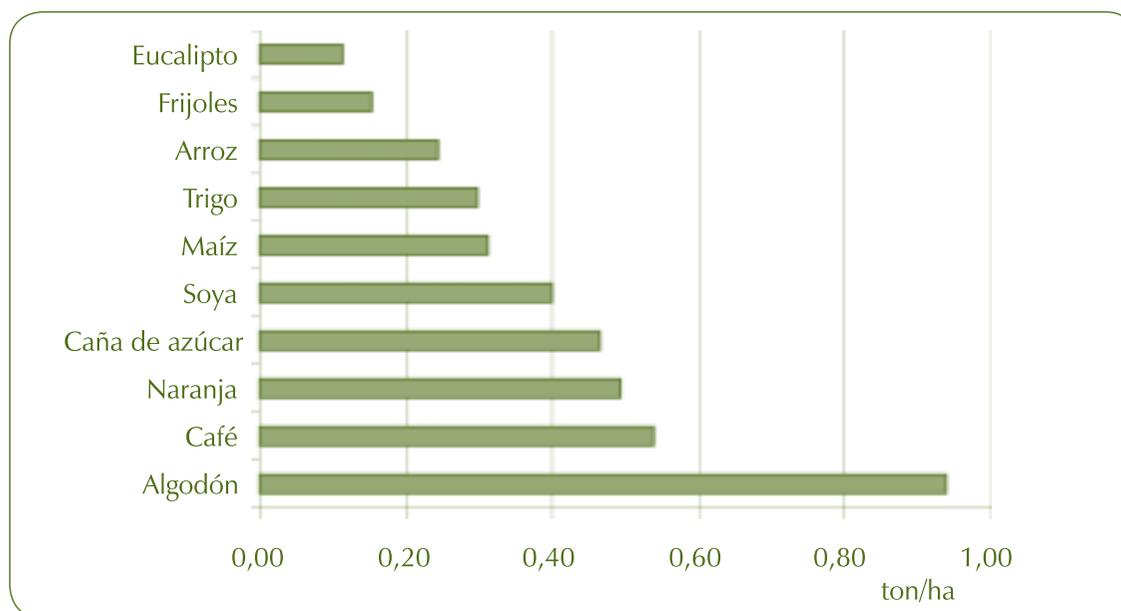
Como el reciclaje de nutrientes es una de sus características principales, el cultivo de la caña en Brasil consume una cantidad relativamente baja de fertilizantes convencionales. De hecho, la fertirrigación con vinaza reduce bastante la necesidad de aporte de potasio. Su complemento extraído de las aguas del proceso industrial y las cenizas de las calderas amplió, significativamente, la oferta de nutrientes usados en las plantaciones de caña, con beneficios económicos y ambientales. Considerando todo el ciclo productivo típico de una plantación (una caña planta y cuatro cañas soca), en las condiciones brasileñas promedio, la aplicación de la vinaza y de la torta de filtro, aunque no traiga efectos relevantes sobre la oferta de nitrógeno, permite reducir la demanda de fósforo (P_2O_5) de 220 kg/ha a 50 kg/ha y de potasio (K_2O) de 170 kg/ha a 80 kg/ha, manteniendo niveles similares de productividad [CGEE (2005)]. Para la producción de bioetanol sólo se usan los azúcares y la fibra de la caña, constituidos por carbono, hidrógeno y oxígeno. En la medida de lo posible, todos los demás nutrientes que la caña utiliza deben retornar al suelo.

Además de esto, se observa que en las plantaciones de caña existe una disponibilidad de nitrógeno bastante superior a los eventuales aportes de los fertilizantes debido a la existencia de mecanismos de fijación biológica de nitrógeno (FBN) por colonias de bacterias del género *Azospirillum*, microorganismos diazótrofos (capaces de transformar el nitrógeno atmosférico en formas asimilables por otros organismos), de vida libre en la región de los rizomas o asociados a gramíneas como la caña. En las últimas décadas se realizaron estudios pioneros en esa área por Johanna Döbereiner, gran científica brasileña e investigadora de EMBRAPA, y estos pueden significar perspectivas de aumento significativos de productividad para la agroindustria de la caña [CNPAB (2008)].

Considerando los cultivos con áreas superiores al millón de hectáreas, la caña de azúcar se sitúa, actualmente, en el cuarto lugar en consumo de abonos químicos por hectárea en Brasil, como se muestra en el Gráfico 24, preparado con datos de la Asociación Nacional de Difu-

si3n de Abonos (ANANDA) y levantamientos del IBGE. Este nivel de consumo de fertilizantes de la ca3a puede considerarse relativamente bajo, si se lo compara con el de otros pa3ses. Frente a los valores sugeridos por el CTC para el abono de la ca3a soca y de la ca3a planta en la regi3n Centro Sur, con la aplicaci3n de, respectivamente, 290 kg y 260 kg de una f3rmula promedio $N-P_2O_5-K_2O$, los niveles de abono adoptados para la ca3a en Australia son del 30% y el 54% m3s que en Brasil [Donzelli (2005a)].

Gr3fico 24 – Consumo de fertilizantes en las principales plantaciones de Brasil



Fuente: Donzelli (2005a).

El abono complementario obtenido de los subproductos reciclados es importante para asegurar la producci3n de ca3a en las condiciones actuales, sin que los niveles de productividad disminuyan significativamente. En la actualidad el consumo de fertilizantes representa una proporci3n muy destacada en los costos agr3colas, hecho que justifica la creciente adopci3n de nuevas tecnolog3as para intentar disminuir la demanda de abono y piedra caliza, racionalizando as3 su uso. En este sentido, se pueden citar formas innovadoras de distribuci3n de fertilizantes con reducci3n de p3rdidas por volatilizaci3n as3 como el incremento de materia org3nica con la cosecha de la ca3a cruda [Gaval et al. (2005)]. Tambi3n es importante la agricultura de precisi3n, que emplea mapas de productividad con los atributos f3sicos y qu3micos del suelo (granulometr3a, niveles de macronutrientes y micronutrientes, acidez, densidad y resistencia a la penetraci3n). Pueden obtenerse importantes econom3as de fertilizantes al sustituir la aplicaci3n uniforme de abonos por la aplicaci3n variable, de acuerdo con las informaciones detalladas del suelo. La aplicaci3n de la agricultura de precisi3n en el Ingenio Jales

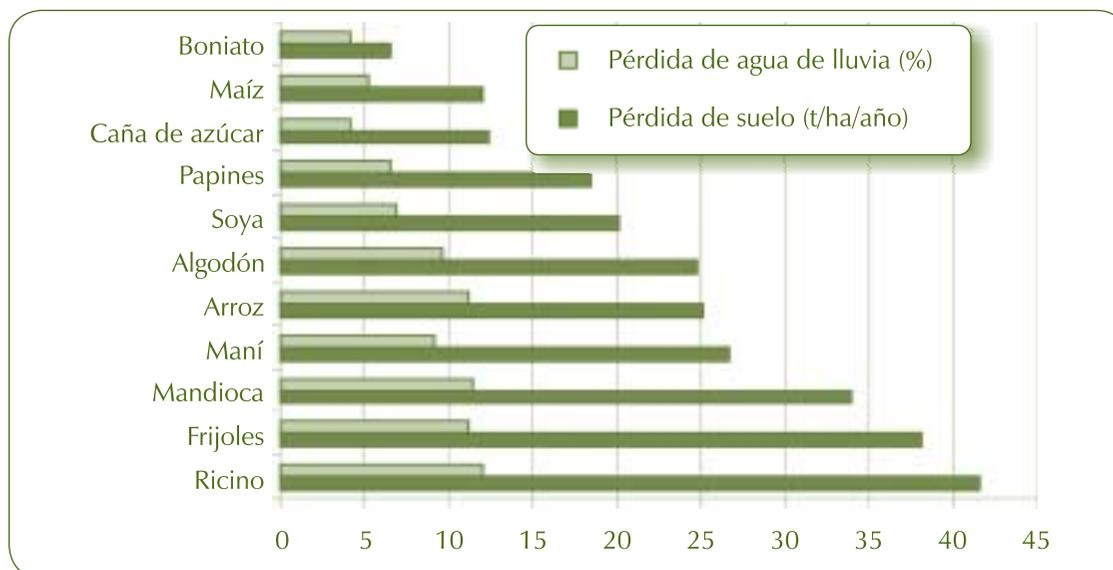
Machado, en Goianésia (GO), mostró una reducción del 34,5% en la aplicación de piedra caliza y 38,6% en la aplicación de fósforo, lo que significa un ahorro de un 36% por hectárea abonada, manteniendo los mismos niveles de productividad [Soares (2006)]. Nuevos estudios en la región de Araras, en São Paulo, indicaron que pueden esperarse reducciones del 50% del consumo de fertilizantes fosfatados y potásicos con la adopción de tasas variables de aplicación [Cerri (2005)] y se estima que, actualmente, un 10% de las plantaciones de caña en Brasil ya estén utilizando alguna forma de agricultura de precisión para aplicar fósforo y piedra caliza en tasas variables (Molin, 2008).

En síntesis, el uso de fertilizantes, tan importantes para la productividad de las plantaciones de caña brasileñas, está disminuyendo debido al reciclaje de nutrientes en el proceso industrial, y a la introducción progresiva de nuevas tecnologías disponibles de fertilización.

Erosión y protección del suelo

Provocado generalmente por prácticas agrícolas inadecuadas, el proceso erosivo es la mayor causa de degradación de las tierras agrícolas y se asocia, muchas veces, con la pérdida irreversible de suelo cultivable. Por este motivo, la utilización productiva de las tierras debe tener en cuenta el tipo de suelo (textura, tipos de horizonte diagnóstico, tasa de infiltración de agua), el declive, el régimen de lluvias y el cultivo que será instalado y establecer parcelas, caminos y líneas de cultivo, para proteger la capa fértil del suelo. Como el cultivo de la caña de azúcar se practica desde hace siglos en Brasil (en muchos casos, en la misma área), hay suficiente información sobre su impacto en la conservación del suelo [Donzelli (2005b)].

Gráfico 25 – Pérdidas de suelo y de agua de lluvia en algunos cultivos en Brasil



Fuente: Donzelli (2005b).

Planta semiperenne, característica que reduce el número de operaciones agrícolas (que muchas veces producen pérdida de la capa fértil del suelo), la caña de azúcar es un cultivo poco susceptible a la erosión, como puede observarse en el Gráfico 25, donde se presentan datos de pérdida de suelo por hectárea y año y pérdida de agua de lluvia en los diferentes cultivos en Brasil. Por ejemplo, la pérdida de suelo que ocurre en las plantaciones de caña es de alrededor del 62% del valor observado en la soya. Desde el punto de vista de la capacidad de retener el agua de lluvia, aspecto importante para la producción agrícola y para la protección del suelo, la caña se muestra como uno de los cultivos más eficientes, como también se muestra en el Gráfico 25.

El uso creciente de la cosecha de caña cruda, comentado en párrafos anteriores, en que la paja protege el suelo contra el impacto directo de las gotas de lluvia y de sistemas de labranza mínima, con menor movilización del suelo, en los próximos años deberá mejorar aún más el nivel de conservación de suelos cultivados con caña de azúcar, significando una reducción de aproximadamente un 50% de pérdida de agua de lluvia [(Donzelli (2005b)].

Biodiversidad

La producción eficiente de bioetanol de caña de azúcar impone, inevitablemente, las plantaciones de caña, monocultivo cuyo impacto ambiental depende de las características originales del terreno ocupado y de la adopción de prácticas mitigadoras. No es lo mismo el establecimiento de plantaciones de caña en áreas donde antes existían otros cultivos o ganadería, que el cultivo en áreas de bosques naturales. En los primeros casos ocurre una sustitución de usos del suelo, mientras que en el segundo pueden producirse grandes impactos negativos.

La legislación brasileña (particularmente, el Código Forestal Brasileño, Ley 4.771, de 1965, y la Ley 7.803, de 1989) determina que, en las propiedades agrícolas se debe mantener una Reserva Legal (RL). La Reserva Legal es un área ubicada en el interior de una propiedad rural, que se convierte en área de preservación permanente, indispensable para el uso sostenible de los recursos naturales, la conservación y el mantenimiento de los procesos ecológicos, la conservación de la biodiversidad y el abrigo y la protección de la fauna y flora nativas. La RL debe ocupar al menos un 20% del área total y el porcentaje depende de la región (en la Amazonia, es el 80%). En ese espacio se debe mantener toda la vegetación original al igual que en las Áreas de Preservación Permanente (APP) – áreas en cumbres de sierras, vertientes y márgenes de cuerpos de agua.

Lamentablemente, la expansión de las fronteras agrícolas en las últimas décadas ignoró estas disposiciones. En la actualidad existe una mayor conciencia ambiental y se han intensificado las actividades de las instituciones públicas en este campo. También se cuenta con sistemas de monitoreo de imágenes por satélite, como se muestra en la Figura 26. Se exige que las entidades gubernamentales controlen la práctica agrícola de los distintos ingenios, tanto los que ya existen como los que están en fase de implantación. Como ejemplo del primer caso, en muchos ingenios del estado de São Paulo se observó durante la última década la reducción

de las plantaciones de caña en áreas de vegetación ciliar (riparias) y la recomposición forestal en nacientes. De modo que, aun con una significativa expansión de las actividades agrícolas, se observa un aumento marginal de la cobertura forestal en este estado brasileño, estimado en 3,5 millones de hectáreas [Instituto Florestal (2004)]. En el caso de las nuevas unidades, especialmente en la sabana, con el propósito de reducir los riesgos legales y mejorar su imagen, las empresas están preocupadas por actuar de modo ambientalmente correcto e intentan desde el inicio de sus actividades respetar la legislación referente a las Áreas de Preservación Permanente y a las Reservas Legales.

Figura 26 – Ejemplo de una imagen tomada por un satélite, utilizada para el monitoreo de la cobertura vegetal



Fuente: CTC (2008).

Teniendo en cuenta la magnitud de las áreas cultivadas con caña de azúcar, a pesar de ser un cultivo menos agresivo por utilizar técnicas como el reciclaje de subproductos y el control biológico de plagas, es esencial que la agroindustria del bioetanol respete, de modo muy estricto, la legislación ambiental y que sea debidamente penalizada por eventuales desvíos. La experiencia actual en muchos ingenios brasileños, con buenos resultados en la relación agroindustria/ambiente, y el uso de tecnologías agrícolas e industriales de bajo impacto ambiental, confirman la posibilidad de producir bioetanol de caña de azúcar de modo racional. Durante el plantío, los ingenios prefieren adoptar prácticas ambientales conservacionistas ya que son, desde el punto de vista económico, muy interesantes [Smeets et al. (2006)].

No obstante, es muy importante observar que la efectiva aplicación de la legislación y la difusión de una posición más favorable a la protección ambiental, en todos los aspectos ya

comentados, como biodiversidad, recursos hídricos y suelo, derivan sobre todo, de la presencia clara y activa del Estado, implementando y fiscalizando el cumplimiento de la legislación ambiental. El papel del estado se manifiesta a través de la actuación de entidades públicas y privadas y se coloca, de forma clara, a favor del desarrollo responsable de la bioenergía en el país, procurando impulsar las alternativas menos nocivas, e intentando mejorar el preocupante *status quo* energético global [FBDS (2005)].

Otros aspectos ambientales

Recientemente se presentaron dos nuevas cuestiones ambientales relacionadas con la producción de bioetanol y de caña de azúcar: las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas al cambio del uso del suelo, con la pérdida de su cobertura original, al momento de la implantación de las plantaciones y el proceso indirecto de la deforestación causada por las plantaciones de caña donde antes había áreas de pastos. Ese cambio determina la transferencia del ganado hacia las fronteras agropecuarias donde se forman nuevas áreas de pastos. Se trata de temas complejos, aún en discusión, pero de los que se puede adelantar algunas informaciones importantes.

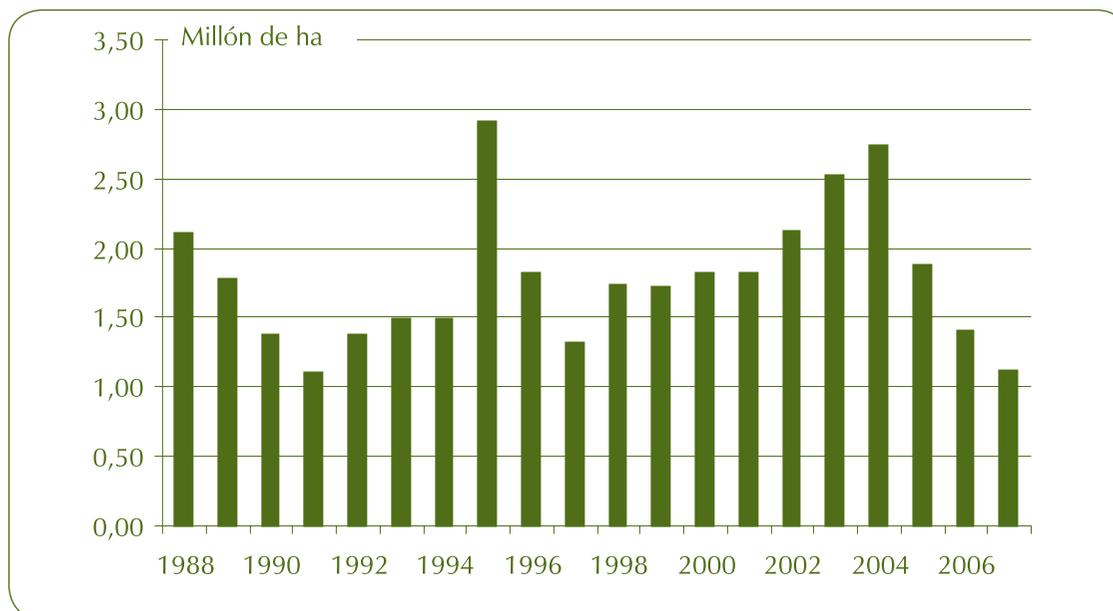
El impacto del cambio del uso de la tierra determinada por la producción de materia prima para biocombustibles en las emisiones de gases de efecto invernadero está siendo considerado por varios estudios. Dependiendo de la vegetación que había antes en el área ahora utilizada para la producción de biocombustible, el cambio del uso del suelo podría liberar a la atmósfera una cantidad de carbono antes retenido en la vegetación y en el suelo, suficiente como para comprometer el equilibrio ambiental. Sin embargo, aún existe bastante incertidumbre sobre la magnitud de este efecto, ya que las concentraciones de carbono en el suelo, en condiciones de equilibrio, dependen entre otros factores, del cultivo, del tipo de suelo, del manejo de los cultivos y del clima del lugar. También las tasas de liberación y acumulación de carbono posteriores al establecimiento de la plantación de la materia prima dependen de muchos factores. Los resultados de algunas evaluaciones establecen que, entre todos los biocombustibles estudiados, el bioetanol producido con caña de azúcar en la sabana brasileña es una de las alternativas de menor impacto ambiental [Fargione (2008)], claro que estas afirmaciones deben continuar siendo investigadas. Esta es un área que debe ser bien estudiada y son necesarias más investigaciones para afirmar, de modo consistente, el volumen real de estas emisiones en el ciclo de vida de los biocombustibles.

Además, en el caso del bioetanol producido en Brasil, no es muy probable que se puedan asociar a su cultivo pérdidas de áreas forestales, ya que, la expansión de la plantación de caña sucede, básicamente, en lugares antes ocupados por pastos de baja productividad o cultivos anuales destinados en gran parte a la exportación, como la soya. En esos casos se observa que el sistema radicular y la biomasa del suelo son, generalmente, de menor magnitud que la caña. Otro aspecto que debe ser tomado en cuenta es el efecto del incremento de la cosecha de caña cruda, a partir de la cual se incorpora al suelo una mayor cantidad de paja y, por lo tanto, mayor cantidad de carbono [Macedo (2008)].

La segunda cuestión, la deforestación indirectamente inducida por la expansión del cultivo de la caña de azúcar, presenta un argumento difícil de sostener. Se critica el bioetanol pero existen pocos indicios y pruebas. En todo el planeta, los bosques tropicales sufren una enorme presión por el uso, racional o no, de sus recursos madereros y por la posibilidad de dar espacio a nuevos frentes de ocupación agropecuaria. En Brasil, país dotado de grandes extensiones cubiertas por bosques nativos, el proceso de deforestación es uno de los principales desafíos de los gobiernos que pretenden ordenar el proceso de ocupación de la selva Amazónica, con la definición de áreas de protección, el aumento de la fiscalización, la coordinación de la actividad de diversos órganos y la utilización de tecnología moderna (como imágenes de satélite).

Entre los años 2000 y 2006, la pérdida de grandes áreas forestales en la región amazónica brasileña alcanzó un promedio anual de 1,8 millones de hectáreas, y en los últimos años ha disminuido, como lo muestra el Gráfico 26 de la región de la Amazonía Legal, elaborado con los resultados del análisis de imágenes tomadas por satélite. Aunque sólo se podrán confirmar las tasas de deforestación en los próximos años [INPE (2008)]. Se estima que un 17% del área original de la selva amazónica fue deforestada, principalmente para la explotación maderera, la producción de carbón vegetal para siderurgia, para su posterior ocupación por sistemas extensivos de cría de ganado bovino de corte y plantaciones de soya [ISA (2008)].

Gráfico 26 – Deforestación anual en la región amazónica brasileña



Fuente: INPE (2008).

Durante la última década (1998-2007), el área deforestada de la Amazonia brasileña pasó a ser de 19 millones de hectáreas, una superficie casi diez veces mayor a la expansión pro-

ducida en el área de caña para producir bioetanol. En la región amazónica, la producción de bioetanol no implica deforestación, sino que impone el ordenamiento de la expansión de las actividades agropecuarias y la mejora de las medidas de fiscalización. Brasil, así como muchos otros países situados en la región tropical húmeda del planeta, posee tierras disponibles para una importante expansión de la producción agrícola, pudiendo producir alimentos y bioenergía de forma sostenible, sin tener que renunciar a su patrimonio forestal, como se discutirá detalladamente en el próximo tópico.

7.2 Uso del suelo

Un tema importante a discutir sobre el bioetanol es la cuestión del uso de las tierras agrícolas, su disponibilidad y el eventual impacto sobre la disponibilidad de alimentos. Este apartado analiza estos aspectos desde el punto de vista de la producción del bioetanol de caña de azúcar en Brasil, evaluando la evolución del uso de las tierras agrícolas durante las últimas décadas. Además, se presentan las perspectivas de la zonificación agroecológica y se concluye con un análisis del potencial estimado para la expansión del cultivo de caña en el país.

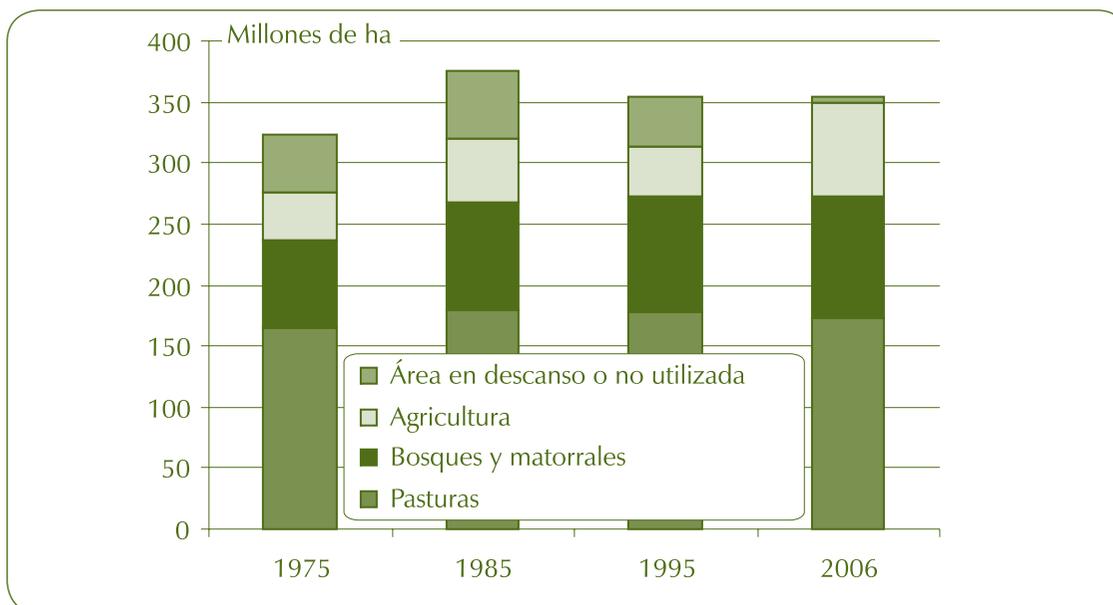
En el capítulo siguiente se analizarán las relaciones entre la producción bioenergética y la seguridad alimentaria desde una perspectiva global, incluyendo la producción de otros combustibles.

Evolución del uso de tierras agrícolas en Brasil

Brasil tiene una superficie total de 851,4 millones de hectáreas, en gran parte cubierta por bosques tropicales. Según los resultados del Censo Agropecuario de 2006, el área de las propiedades rurales brasileñas que excluye áreas protegidas, cuerpos de agua y áreas no aptas para la agricultura, e incluye las reservas legales mencionadas anteriormente, da un total de 354,8 millones de hectáreas (42% del área total del país), dedicados a pastos naturales y plantadas, silvicultura, bosques nativos y plantaciones perennes y anuales. En los últimos 30 años, la evolución de los diversos tipos de uso del suelo se puede observar en el Gráfico 27, en el cual se destacan la variación relativamente pequeña del área total de las propiedades y la significativa expansión de las áreas agrícolas en el decenio pasado.

Entre 1995 y 2006, la agricultura brasileña aumentó un 83,5% y pasó a ocupar 76,7 millones de hectáreas, cerca del 9% del área nacional. Tal crecimiento se dio, principalmente, en áreas no utilizadas o en descanso y, en menor grado, sobre el área de pastizales, que se redujeron en 5,4 millones de hectáreas, pasando a representar cerca del 20% del territorio brasileño. Este crecimiento de la agricultura en el área de pastos es un proceso sistemático desde los años 70, y produjo una reducción del área de pastos de 4,5 millones de hectáreas en 1970 a 2,2 en el año 2006.

Gráfico 27 – Uso de la tierra en propiedades rurales de Brasil

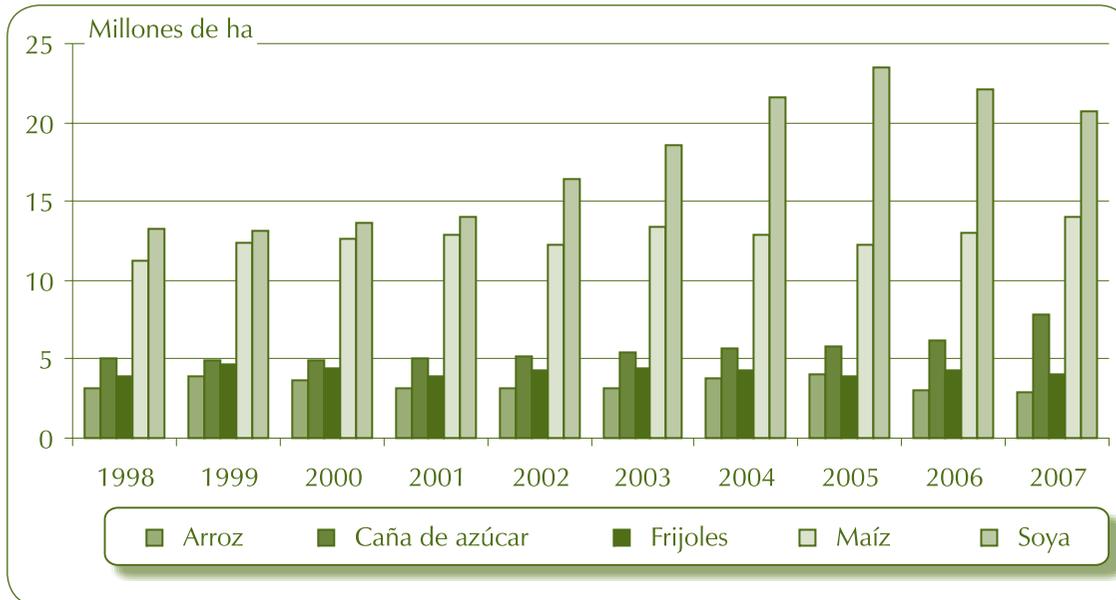


Fuente: IBGE (2007).

En el año 2007, el cultivo de caña en Brasil ocupó 7,8 millones de hectáreas, cerca de un tercio de la superficie ocupada por la soya y la mitad del área cultivada con maíz, como se muestra en el Gráfico 28. Aproximadamente, la mitad de la caña producida se destina a la fabricación de bioetanol. Por tanto, las plantaciones de caña para la producción de combustibles en Brasil corresponden a un 5% del área cultivada, a un 1% del área de las propiedades agrícolas, a un 2,3% de las áreas dedicadas a pastos y a un 0,5% de la superficie del país. Estos porcentajes resultan, tanto de la extensión territorial del país como del buen desempeño de la caña en la captación de energía solar. Cualquier otra materia prima con la actual tecnología demandaría una mayor extensión de los terrenos de cultivo. En el gráfico 29 se puede observar una representación del área dedicada a varios cultivos y, especialmente, al de la caña con fines energéticos.

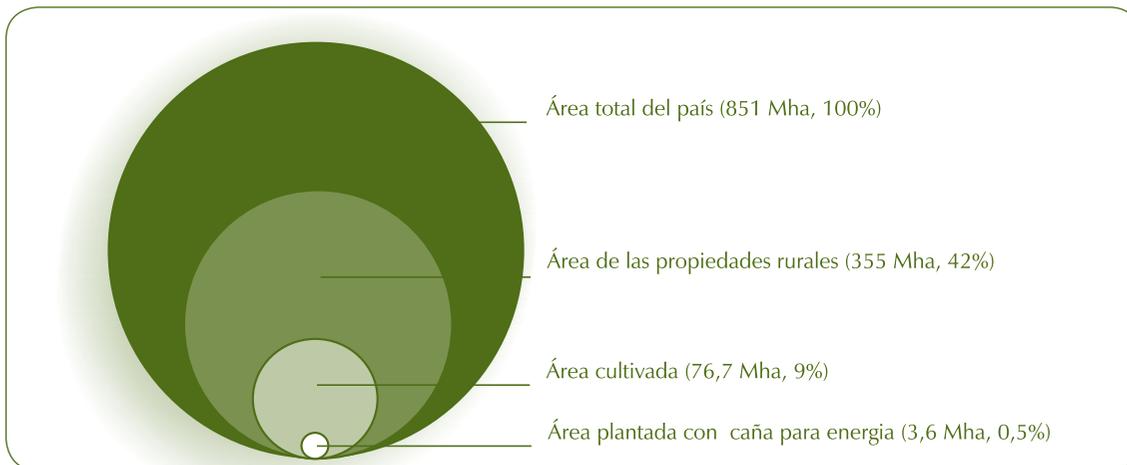
Entre 1998 y 2007, el aumento significativo del área plantada con caña observado en la región centro oeste del Brasil confirma la tendencia de la agroindustria de expandirse en las regiones próximas a las áreas tradicionalmente productoras y que presentan topografía y condiciones edafoclimáticas adecuadas. Aunque existan carencias de infraestructura, especialmente de transporte, esta región se transformó en un nuevo e importante eje de la agroindustria de caña en Brasil. En esta zona, la expansión de caña de azúcar tiene lugar principalmente a través de la sustitución de pastos y, eventualmente, de cultivos de soya que, desde hace algunas décadas, habían reemplazado a la sabana original.

Gráfico 28 – Evolución del área utilizada por los principales cultivos en Brasil



Fuente: IBGE (2007).

Gráfico 29 – Uso de la tierra en Brasil



Fuente: IBGE (2007).

Zonificación agroecológica

En el año 2008, con la intención de ordenar la expansión de la agroindustria de la caña en Brasil, se desarrolló la Zonificación Agroecológica de la Caña de Azúcar (ZAE-Caña) bajo la coordinación del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Abastecimiento (MAPA). Sus primeros resultados estarán disponibles este año. Se trata de un estudio liderado por EMBRAPA

Suelos, involucrando decenas de instituciones e investigadores, con el propósito de definir las áreas aptas y las regiones para las cuales no se recomienda este cultivo en gran escala. La zonificación debe ser utilizada como instrumento orientador de políticas de financiación, inversiones en infraestructura y perfeccionamiento del marco tributario, así como para eventuales certificaciones socioambientales que se establezcan en el futuro [Strapasson (2008)].

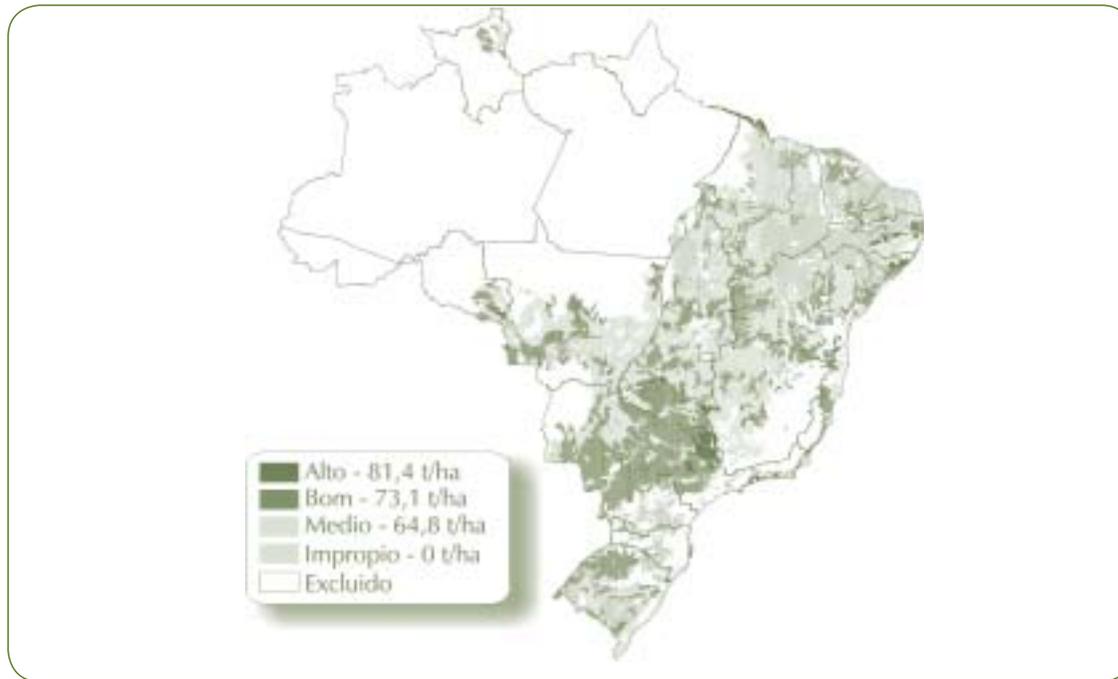
La zonificación estudió las áreas agrícolas y ganaderas en las cuales aún no se cultiva caña, regiones que representan un potencial aparente. La zonificación agroecológica combina informaciones de mapas del suelo, de clima, de áreas de reserva ambiental, geomorfológicos y topográficos, identifica el uso de la tierra actual, examina la legislación ambiental federal y estatal y analiza datos agronómicos de la caña de azúcar, como temperaturas ideales para su crecimiento, tipos de suelo en que ésta se adapta mejor, necesidades hídricas etc. De esta forma, se definen y se clasifican las áreas de mayor potencial para el establecimiento de plantaciones de caña, y las áreas donde no se puede o no se recomienda este cultivo. Como condicionante, en este estudio se estableció un nivel mínimo de productividad, determinado por el promedio nacional de 70 toneladas por hectárea de caña.

Potencial de expansión del cultivo de caña de azúcar en Brasil

Menos detallado que la zonificación agroecológica antes mencionada, pero con el mismo objetivo de examinar las posibilidades y los impactos de la producción de grandes cantidades de bioetanol apuntando a la sustitución parcial de gasolina en escala global, el estudio desarrollado por el Centro de Gestión de Estudios Estratégicos (CGEE) con el Núcleo Interdisciplinario de Planificación Energética (Nipe) de la *Universidade Estadual de Campinas* (Unicamp), efectuó un levantamiento de las áreas con potencial para la producción de caña. El estudio se realizó con la ayuda de mapas de suelos y mapas climáticos, considerando las disponibilidades hídricas y los declives de los terrenos (menos que 12°, para facilitar la cosecha mecanizada), las áreas protegidas o de preservación, como el Pantanal y la Selva Amazónica, y las áreas de reservas forestales e indígenas [CGEE (2005)]. Los resultados del análisis se muestran en las Figuras 27 y 28, con las áreas clasificadas de acuerdo a su aptitud para el cultivo de la caña, sin irrigación y con irrigación de salvación, así denominada por ser utilizada únicamente en las plantaciones de caña en formación, donde el incremento de producción es un objetivo secundario, siendo aplicadas láminas de agua inferiores a 200 mm en los períodos de déficit crítico (equivalente a un aporte de agua de menos de 2.000 m³/ha.año).

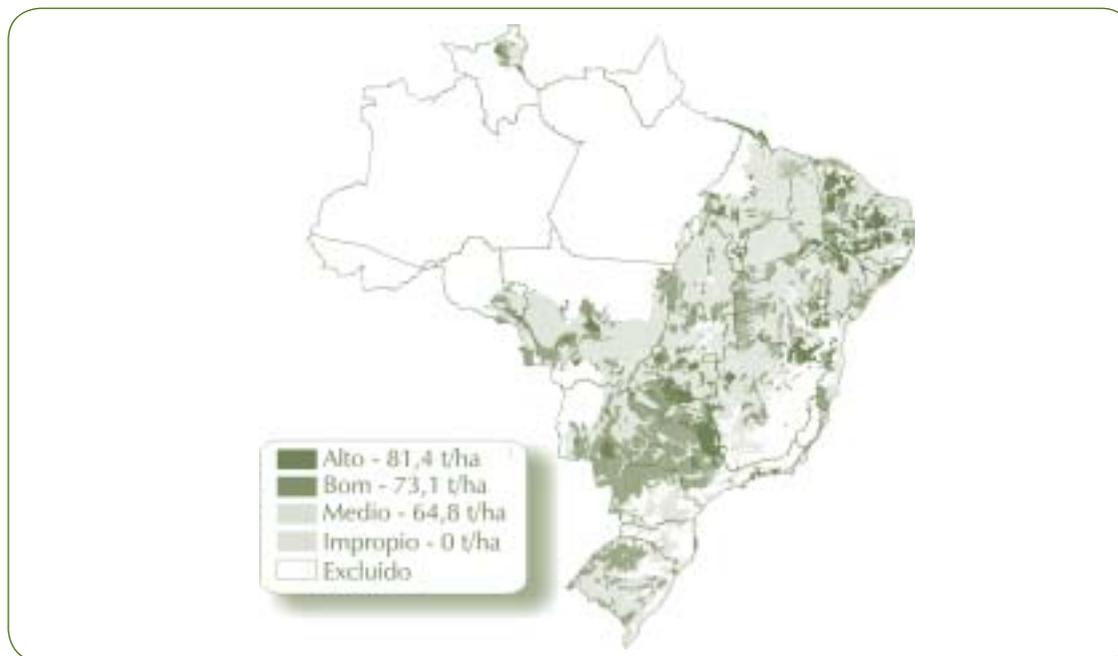
En el mapa de potencial de plantación de caña sin irrigación (Figura 27), es posible observar que gran parte de las regiones con áreas de alto y medio potencial, equivalentes a 121,8 millones de hectáreas (33,7% del total), están ubicadas en el centro sur de Brasil. Estas áreas, sin importantes restricciones de suelos o clima, presentan un relieve plano o suavemente ondulado. Por otro lado, cuando se considera la aplicación de la irrigación de salvación, representado en el mapa de la Figura 28, las áreas de alto y medio potencial pasan a 135,9 millones de hectáreas (37,6% del total), observándose, en este caso, un incremento significativo del potencial de producción de la región semiárida nordestina [CGEE (2005)].

Figura 27 – Potencial del cultivo de caña sin irrigación



Fuente: CGEE (2005).

Figura 28 – Potencial del cultivo de caña con irrigación de salvación



Fuente: CGEE (2005).

En la tabla 31 se muestra una síntesis de estos resultados. Vale la pena destacar que, en esa clasificación de productividad esperada, el valor definido de 65 t/ha para bajo potencial es el promedio mundial de productividad del cultivo de caña, por lo que también pueden considerarse para fines de expansión de este cultivo 167,5 Mha (46,4 %).

Tabla 31 – Potencial para la producción de caña en Brasil

Potencial	Productividad esperada (t/ha)	Área con potencial de utilización			
		Sin irrigación		Con irrigación	
		Millones de ha	%	Millones de ha	%
Alto	> 80	7,90	2,2	37,92	10,5
Medio	>73	113,90	31,5	98,02	27,1
Bajo	> 65	149,22	41,3	167,65	46,4
No apropiado	< 65	90,60	25,1	58,00	16,0
Total	–	361,62	100,0	361,59	100,0

Fuente: CGEE (2005).

De esta manera, la expansión de la agroindustria del bioetanol, dentro de escenarios de crecimiento significativo, con respeto a las áreas protegidas y asegurada una productividad elevada, no enfrenta, en el caso brasileño, restricciones significativas en términos de disponibilidad de tierras. En este sentido, las estimaciones que se presentan a continuación ayudan a reforzar este argumento.

Como un ejercicio de las potencialidades existentes, considerando los valores globales de la cosecha 2007/2008, se produjeron en Brasil cerca de 22 mil millones de litros de bioetanol en 3,6 millones de hectáreas. Para alcanzar el agregado de 10% de alcohol anhidro en toda la gasolina consumida en el mundo (1,3 mil millones de metros cúbicos), serían necesarios 136,5 mil millones de litros de bioetanol, cuya producción, en las condiciones brasileñas, demandaría 23 millones de hectáreas, área equivalente a la ocupada actualmente por la soya. En condiciones similares de productividad y eficiencia energética, esta producción podría tener lugar en las distintas regiones tropicales húmedas del planeta, ubicadas en Latinoamérica y el Caribe, África y Asia, donde tradicionalmente se practica el cultivo de la caña de azúcar, como se comentó en el Capítulo 3 y se muestra en la Figura 29. La producción de biocombustibles a partir de otras materias primas o a través de cualquier otra vía tecnológica exigirá el cultivo de superficies mucho más extensas.

Desde una visión prospectiva y analizando escenarios que consideran la producción en clusters (agrupamiento de unidades productoras de etanol) para asegurar una logística eficiente y las necesidades de territorio para otros cultivos agrícolas permanentes y temporales, un estudio del CGEE estima que en 2025 existirán 80 millones de hectáreas de cultivo de caña en Brasil. Este mismo estudio estimó que serán necesarios 205 mil millones de litros de bioetanol para reemplazar el 10% del consumo mundial de gasolina. Considerando dos niveles

de mezcla de bioetanol en la gasolina consumida globalmente (5% y 10%) y dos escenarios tecnológicos (actual y mejorado), se estimaron los requerimientos de área para abastecer el mercado brasileño y global de azúcar y de bioetanol, teniendo en cuenta, además, que el 20% del territorio debe ser mantenido como reserva ambiental, con los resultados resumidos en la Tabla 32 [CGEE (2005)].

Figura 29 – Áreas cultivadas con plantaciones de caña de azúcar



Fuente: Adaptado de Tetti (2005).

Tabla 32 – Demanda de áreas para la producción de bioetanol para abastecer el mercado global en 2025

Escenario	Consumo global de etanol (Mm ³ /año)	Tecnología	Área cultivada con caña (Mha) para:			Área requerida total	Uso de la tierra disponible
			Producción de azúcar: mercado interno y exportación	Producción de bioetanol			
				Mercado interno	Exportación		
E5	102,5	Actual	4,5	8,5	19,0	32	40%
		Mejorada	4,0	6,0	15,0	25	31%
E10	205,0	Actual	4,5	8,5	38,0	51	64%
		Mejorada	4,0	6,0	30,0	40	50%

Fuente: CGEE (2005).

Los incrementos de productividad en la agroindustria de la caña, así como la progresiva incorporación de tecnologías innovadoras para la producción de biocombustible, podrán

reducir bastante el área requerida para cultivos energéticos. La última línea de la tabla 32 presenta las áreas utilizadas para abastecer la demanda interna asociada a la exportación de azúcar (4 Mha), producir bioetanol suficiente para proveer al mercado interno (6 Mha) y fomentar la mezcla de 10% de bioetanol en el consumo mundial de gasolina (30 Mha), con un requerimiento total de 40 Mha, incluyendo el área reservada para protección ambiental (8 Mha). Esta área representa la mitad de las áreas disponibles para producción bioenergética en Brasil. Esto indica que, efectivamente, la disponibilidad de tierras en condiciones adecuadas no parece ser una limitante para promover la producción de bioetanol para consumo interno y la exportación en las regiones productoras [CGEE (2005)].

7.3 Viabilidad económica del bioetanol de caña de azúcar

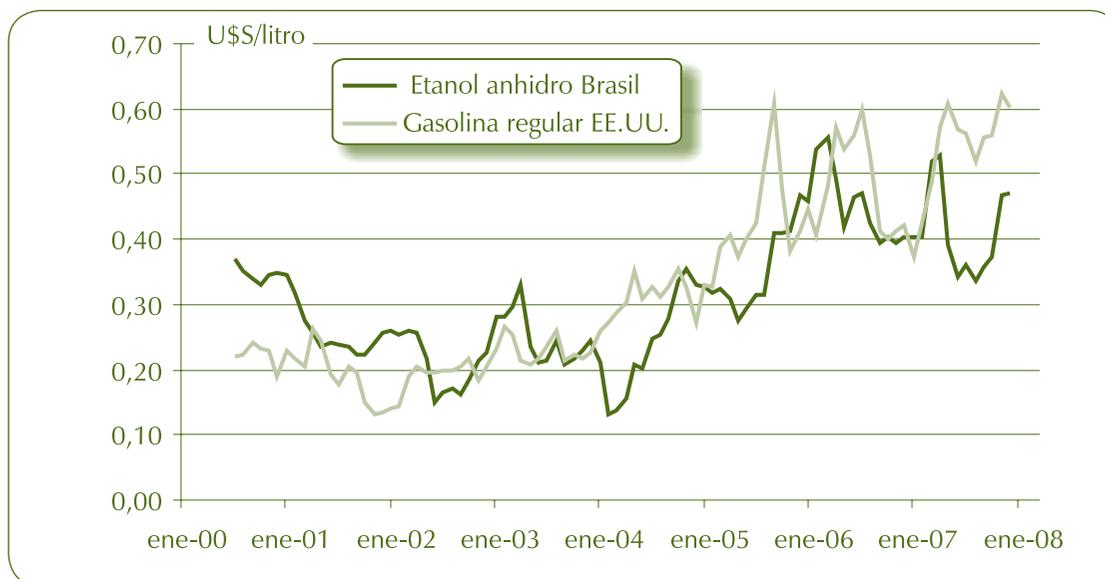
Para la sostenibilidad económica de la industria de bioetanol es fundamental que los costos de producción, incluyendo toda la actividad agroindustrial y los costos de las inversiones para el establecimiento de la plantación y la instalación de la unidad industrial, sean cubiertos por los beneficios económicos de esta agroindustria. En capítulos anteriores se comentaron algunos aspectos económicos, como los mecanismos de formación de precios, la competitividad del bioetanol frente a la producción de azúcar, la relevancia económica del sector sucroalcoholero y la curva de aprendizaje que muestra una importante reducción de costos a lo largo de las últimas décadas. A continuación se retomará el análisis sobre los aspectos económicos de la producción de bioetanol, su competitividad frente al petróleo, la estructura de costos del bioetanol en Brasil y las perspectivas de la evolución del precio de este biocombustible en los próximos años. Es importante destacar que en los últimos años se observa una significativa volatilidad de precios y las tasas de cambio, lo que dificulta el análisis de costos y precios. Sin embargo, a partir de los resultados que se presentan a continuación es posible extraer algunas conclusiones generales.

El bajo costo de producción del bioetanol de caña de azúcar en Brasil es un hecho bastante conocido. En diversas fuentes, se estima que, incluidos todos los insumos y factores de producción, su costo esté entre 0,25 U\$/litro y 0,30 U\$/litro, correspondientes a precios del petróleo entre 36 U\$/barril y 43 U\$/barril. Esta estimación asume el precio de la gasolina un 10% por encima del valor del petróleo bruto en volumen y su reemplazo por bioetanol anhidro con paridad en base volumétrica; es un supuesto consistente, en especial cuando se asume el uso de bioetanol en mezclas como E10. En tales condiciones es patente la viabilidad del uso de bioetanol sustituyendo la gasolina, aunque una confirmación más clara de la ventaja de este combustible surge al comparar los precios sin impuestos en las unidades de producción.

El Gráfico 30 muestra la evolución de los precios pagados a los productores de bioetanol de caña de azúcar y de gasolina, sin fletes ni impuestos, referidos respectivamente al precio del bioetanol anhidro en el estado de São Paulo, según información del Centro de Estudios Avanzados en Economía Aplicada (CEPEA), de la Escuela Superior de Agricultura Luiz de Queiroz de la Universidad de São Paulo, y el precio libre (*spot*) de la gasolina regular en la costa del

Golfo de México (U.S. Gulf Coast Conventional Gasoline Regular Spot Price FOB), de acuerdo a la información proporcionada por la Energy Information Administration de EE.UU. (EIA, 2008). El CEPEA monitorea regularmente los precios de las negociaciones de bioetanol anhidro e hidratado en cuatro estados brasileños (São Paulo, Alagoas, Pernambuco y Mato Grosso), constituyendo una de las fuentes más confiables de informaciones sobre este mercado.

Gráfico 30 – Evolución de precios pagados al productor (sin tributos) de gasolina en los EE.UU. y de bioetanol de caña de azúcar en Brasil



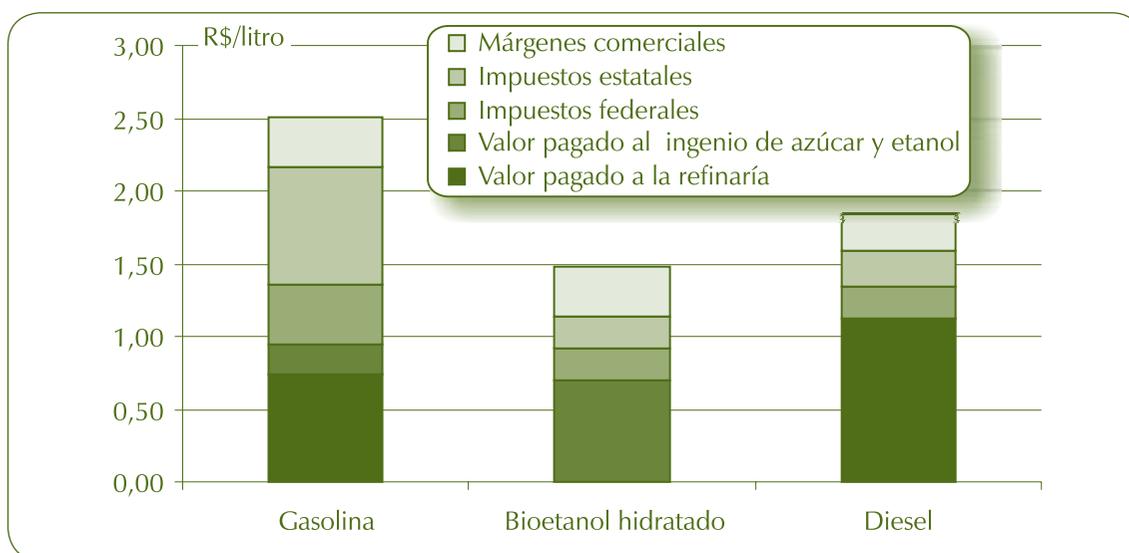
Fuente: Valores tomados de CEPEA (2008) y EIA (2008).

La transformación a moneda estadounidense permite comparar los precios en los EE.UU. y en Brasil, pero debe ser tomada con precaución teniendo en cuenta su significativa desvalorización desde el año 2005, con una caída de cerca del 30% en dos años, lo que tiende a sobrestimar el valor del bioetanol producido en Brasil. En todo caso, como se puede concluir a partir de estas curvas, en los últimos años el bioetanol de caña de azúcar presenta precios a nivel de productor consistentemente más atractivos que la gasolina, sin considerar ningún tributo ni subsidios. En estas condiciones la adición de bioetanol anhidro permite reducir el precio promedio del combustible en el mercado.

En el caso brasileño, la matriz de impuestos federales y estatales distingue entre varios tipos de combustibles vehiculares, considerando las implicaciones económicas y el uso típico de cada uno de ellos, privilegiando el diésel y los biocombustibles. Así, la gasolina soporta un nivel más elevado de impuestos en comparación con el bioetanol hidratado, el gas natural vehicular y el diésel. Existen variaciones en las alícuotas en los tributos estatales (Impuesto sobre Circulación

de Mercaderías y Servicios - ICMS) pero tomando como referencia la situación en Rio de Janeiro en marzo de 2008 se desprende que los tributos, los fletes y los márgenes de comercialización que inciden sobre los precios de los productores, en el caso de la gasolina, el bioetanol hidratado y el diésel elevan el valor del producto en 239%, 112% y 63%, respectivamente, como se muestra en el Gráfico 31. Obsérvese también en este gráfico que el valor pagado al productor de gasolina se refiere a un volumen de 0,75 litro, ya que el producto entregado al consumidor presenta un 25% de etanol anhidro.

Gráfico 31 – Estructura de los precios al consumidor de la gasolina común, el bioetanol hidratado y el diésel en Rio de Janeiro en marzo de 2008

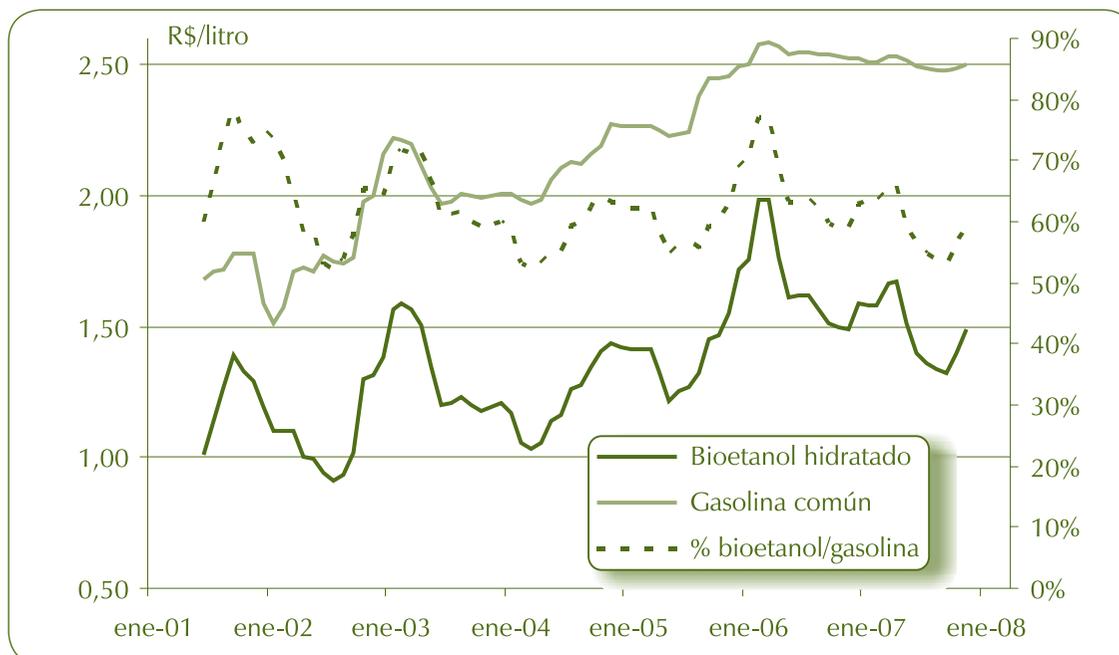


Fuente: Valores calculados en base a ANP (2007), Cepea (2008) y Petrobras (2008).

Otra forma de evaluar la ventaja del bioetanol sobre los combustibles convencionales consiste en comparar el precio promedio de venta al consumidor del bioetanol hidratado con el precio establecido para la gasolina común. Para ello pueden utilizarse los levantamientos de precios de combustibles, realizados regularmente por la Agencia Nacional de Petróleo, Gas Natural y Biocombustibles y aplicados en una muestra amplia que cubre todo el territorio brasileño [ANP (2007)]. Observando las series de precios y evaluado en costo por kilómetro recorrido, se puede constatar que el bioetanol hidratado es competitivo frente a la gasolina, en función tanto de su precio (al productor) menor como de la matriz tributaria favorable, comentada en el párrafo anterior. En el caso de los vehículos *flexible fuel*, en los que el usuario opta por el combustible en el momento de llenar el tanque, se observa que el bioetanol fue más elegido hasta un límite de 70% del precio de la gasolina. En la mayor parte de los últimos años se observa que fue más conveniente utilizar bioetanol en lugar de la gasolina, excepto durante cortos períodos de algunas semanas, como se muestra en el Gráfico 32.

También se puede observar el patrón aproximadamente regular de variación de los precios, elevándose al final del período de cosecha y reduciéndose a su inicio, a mediados del primer semestre.

Gráfico 32 – Evolución de los precios promedio pagados por el consumidor de bioetanol hidratado y de gasolina común y análisis de la relación entre estos precios en Brasil



Fuente: Elaborado según datos de ANP (2007).

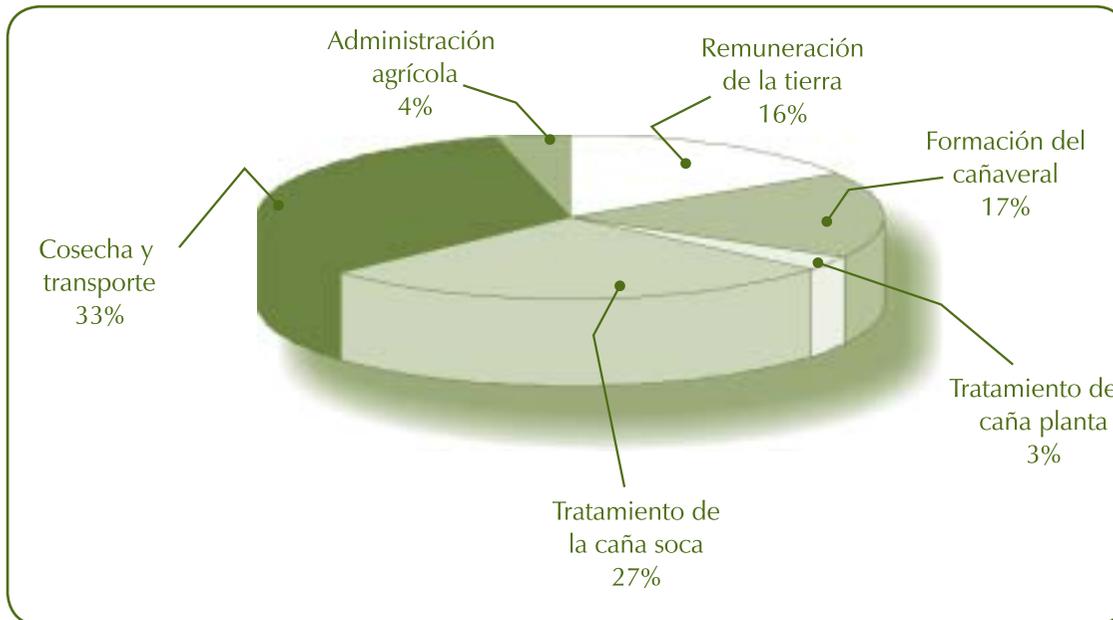
Los datos anteriores se refieren a valores establecidos en los mercados de combustibles, indicando, de forma clara, la conveniencia del bioetanol para los consumidores. No obstante, es también interesante evaluar los costos de producción de este biocombustible y verificar si esos precios remuneran adecuadamente a los productores. En Brasil, durante mucho tiempo, los costos de la agroindustria sucroalcoholera eran controlados por el gobierno federal, que definía todos los precios a lo largo de la cadena de producción y de comercialización. Sin embargo, a partir de la cosecha de 1998 se inició un proceso de liberalización de esta agroindustria que concluyó en 2002, como se explicó en el capítulo anterior. Actualmente, los agentes económicos deciden sus precios libremente con base en estrategias de mercado, teniendo en cuenta las existencias y las perspectivas de evolución de los mercados de azúcar y de combustibles. En este ambiente competitivo, estimar costos es una tarea bastante compleja ya que, además de la gran variedad de situaciones, con diferentes productividades y tecnologías utilizadas, el principal factor al calcular el costo del bioetanol es la materia prima, que puede ser producida por la propia empresa procesadora en terrenos arrendados o culti-

vada por productores independientes. La dificultad de conocer los costos de producción con exactitud no es sólo una característica del mercado del bioetanol, sino que lo es también del petróleo y del gas natural.

En el estudio desarrollado por el Nipe/Unicamp en el año 2005, se estimó para la región centro sur un costo promedio de R\$ 33,16 por tonelada de caña colocada en el ingenio, desagregado como se muestra en el Gráfico 33 [CGEE (2005)]. En ese mismo estudio se estima un costo de R\$ 24,59 por tonelada de caña en Goiás, especialmente debido al costo menor de la tierra.

La Asociación Rural de los Proveedores y Plantadores de Caña de la Región Sorocabana (ASSOCANA) realizó una evaluación más reciente de los costos de producción de caña de azúcar, considerando un ciclo de cinco cortes en seis años e incluyendo las actividades de establecimiento de la plantación, preparación de suelo, plantación, cosecha y transporte, considerando todos los factores de producción (insumos, equipos, tierra, mano de obra) [ASSOCANA (2008)]. Este estudio estimó para abril de 2008 un costo promedio de R\$ 2.513,50 por hectárea por cada corte, resultando en un costo promedio de la caña de R\$ 35,00 por tonelada. Considerando el costo de la materia prima entre R\$ 26,00 y R\$ 35,00, una tasa de cambio de R\$ 2,00 por U\$S y una productividad industrial de 85 litros de bioetanol por tonelada de caña procesada, resulta que la contribución del costo de la materia prima en el costo del bioetanol es de U\$S 0,153 a U\$S 0,206 por litro. Estos valores parecen ser representativos de los actuales costos promedio de la región centro sur brasileña, situándose muy por encima de los U\$S 0,12 por litro que se indicaba como contribución de la materia prima en el costo del bioetanol a fines de los años 90. Se debe recordar que este precio aumentó significativamente debido al incremento de los costos de equipos, fertilizantes y agroquímicos, entre otros. Desde el punto de vista de las aplicaciones alternativas de esta materia prima, el valor de la tonelada de caña dependerá, naturalmente, de los precios del azúcar, habiendo alcanzado niveles del orden de US\$ 0,27 por litro de bioetanol equivalente a mediados del año pasado.

Gráfico 33 – Estructura de los costos de producción de la caña de azúcar en la región centro sur en el año 2005



Fuente: CGEE (2005).

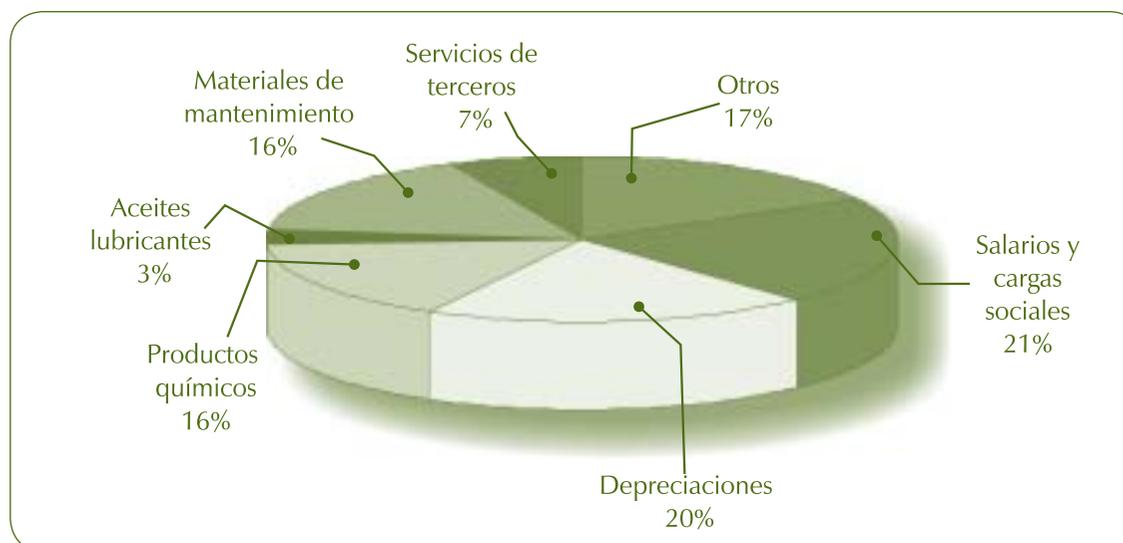
En los últimos años, los costos relacionados con la inversión industrial, el funcionamiento y el mantenimiento de la unidad de procesamiento de caña y producción de bioetanol también se elevaron bastante, especialmente, a causa de los aumentos de precios de los equipos y materiales. El estudio realizado por Nipe/Unicamp estimó que una planta industrial con capacidad anual de procesamiento de dos millones de toneladas de caña de azúcar podría costar cerca de U\$S 97 millones, correspondiendo a costos de capital de U\$S 0,13 estimados para una tasa interna de retorno de 12% y una relación deuda/capital de 50%, con una tasa de interés de 8% y una producción de 40 kWh de energía eléctrica excedente por tonelada de caña procesada, comercializados a U\$S 57 por MWh. Para esta planta se estimaron costos de operación y mantenimiento (incluyendo la depreciación) de U\$S 0,07 por litro de bioetanol producido, como se puede ver en el Gráfico 34 [CGEE (2005) y Almeida et al. (2007)].

De esta manera, considerados todos los factores: materia prima, funcionamiento, mantenimiento e inversión, el costo del bioetanol de caña de azúcar se calcula entre U\$S 0,353 y U\$S 0,406 por litro, valores correspondientes a precios del barril de petróleo entre U\$S 50 y U\$S 57 el barril.

Es probable que en los ingenios que se instalan en nuevas zonas productoras los costos del bioetanol sean inferiores, teniendo en cuenta la ubicación de estas plantas con mayor densidad de plantas (lo que implica menores costos de transporte) y dedicadas exclusivamente

a la producción de biocombustible, reduciendo así sus costos de materia prima y de inversión. Por otro lado, en el caso de los ingenios más antiguos y ya amortizados, el bioetanol debería presentar menores costos financieros del mismo modo que niveles más elevados de producción de energía eléctrica a base de bagazo tienden a mejorar los indicadores de esta agroindustria de manera general. Otra ventaja importante se relaciona con la tasa de cambio adoptada ya que, la gran valorización de la moneda brasileña en los últimos años elevó bastante el valor de los productos de la agroindustria sucroalcoholera expresados en divisas.

Gráfico 34 – Estructura de costos de operación y mantenimiento de una destilería autónoma dedicada a la producción de bioetanol de caña de azúcar en la región centro sur en el año 2005



Fuente: CGEE (2005).

Considerando las posibilidades de continuar incrementando la productividad agrícola e industrial, como se analizó anteriormente, es razonable esperar que los costos de producción del bioetanol de caña de azúcar permanezcan estables o se reduzcan, mientras que en el caso de los combustibles fósiles los escenarios esperados son de mantención de los precios elevados sin perspectivas de reducción a los niveles observados hace algunas décadas [IEA (2007)]. Por tanto, desde el punto de vista económico, la producción de bioetanol de caña de azúcar se presenta como sostenible, con precios y costos viables sin necesidad de subsidios para competir con los combustibles convencionales.

7.4 Generación de empleo y renta en la agroindustria del bioetanol

La estrecha relación entre la producción de bioetanol de caña de azúcar y la demanda de mano de obra es un tema central sobre la bioenergía en Brasil y, sin duda, determinante para

su viabilidad social. La agroindustria de caña es una gran generadora de puestos de trabajo, estimándose a partir de informaciones de la Relación Anual de Informaciones Sociales (RAIS), del Ministerio de Trabajo y Empleo, y de la Investigación Nacional por Muestreo de Hogares (PNAD en sus siglas en portugués), realizada por el IBGE que en el año 2005 había 982 mil trabajadores directamente y formalmente vinculados a la producción sucroalcoholera [Moraes (2005)]. De acuerdo con un estudio basado en la Matriz Insumo-Producto de la economía brasileña en 1997, por cada empleo directo en este sector existían 1,43 empleos indirectos y 2,75 empleos inducidos [Guilhoto (2001)], lo que permite estimar que, en el caso de que se mantuvieran esas relaciones, en el año 2005 había un total de 4,1 millones de personas trabajando en la actividad de la agroindustria de la caña. Estos puestos de trabajo se distribuyen en casi todo el territorio brasileño y cubren una amplia gama de competencias y especializaciones, aunque la mayor parte son empleos de baja calificación.

Gracias a la evolución de las tecnologías empleadas, se observa un menor crecimiento de la necesidad de personal, acompañado por un aumento de la capacitación requerida y un aumento de la calidad del trabajo desarrollado. Esta dinámica ha generado muchos estudios en el ámbito de la economía y la sociología rurales, que proporcionan una visión amplia de los actuales procesos y sus implicaciones. En los próximos párrafos se abordarán algunas cuestiones asociadas a la generación de empleo y renta en el marco de la producción de bioetanol. En primer lugar se revisarán los datos de los niveles de empleo y su evolución reciente, posteriormente se discutirán sus perspectivas, en especial aquellas asociadas a la expansión de la mecanización de la cosecha de caña.

Del total de empleos directos y formales en la agroindustria sucroalcoholera, que en los últimos años se expandió significativamente como se observa en la Tabla 33, el 63% se encuentra en la región centro sur, donde se produce más del 85% de la caña brasileña, lo que muestra una mayor productividad del trabajo en esta región. La cantidad de trabajadores por unidad de producto en la región nordeste es tres a cuatro veces mayor que los valores observados en la región centro sur [Macedo (2005a)]. En efecto, al relacionar los datos de producción de caña [Mapa (2007)] con el número de empleados en el sector [Moraes (2007)] se obtiene la productividad por trabajador, del Gráfico 35. Es evidente, de acuerdo a este gráfico, el significativo aumento de productividad en la agroindustria de la región centro sur, con niveles superiores a 500 toneladas de caña por trabajador, mientras que los valores de la región nordeste se mantienen sin cambios relevantes.

La plantación de la caña, los tratamientos de los cultivos y, principalmente, su cosecha representan las mayores demandas de personal temporal en un ingenio azucarero y de bioetanol, correspondiendo a un 70% de la mano de obra contratada, con niveles de empleo diferentes durante los períodos de cosecha y entre cosechas. En el caso de una planta agroindustrial moderna, que procesa anualmente dos millones de toneladas de caña, se necesitan cerca de 2.500 empleados, un valor que puede variar bastante, dependiendo de las características tecnológicas de la planta y de su nivel de mecanización [Macedo (2005a)]. En el estudio desarrollado por el Nipe/Unicamp, considerando agrupamientos de 15 ingenios productores

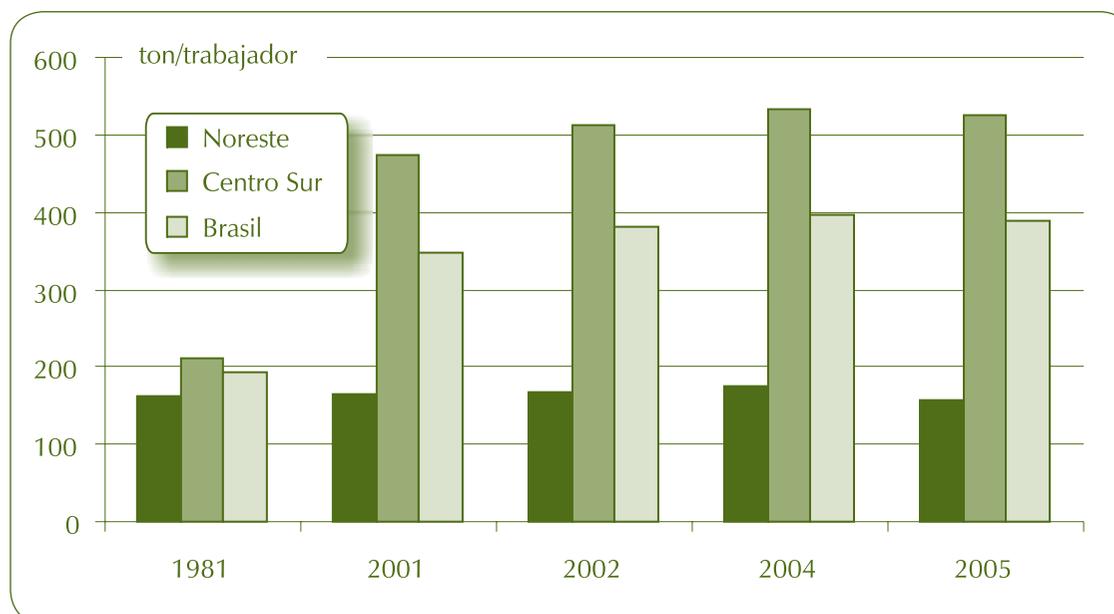
de bioetanol, con capacidad de molienda de dos millones de toneladas de caña cada una, se estimó una generación total de 22 mil empleos [CGEE (2005)].

Tabla 33 – Empleos directos formales del sector sucroalcoholero, según actividad y región

Actividad	Región	Año			
		2000	2002	2004	2005
Producción de caña	Norte Nordeste	81.191	86.329	104.820	100.494
	Centro Sur	275.795	281.291	283.820	314.174
	Brasil	356.986	367.620	388.121	414.668
Producción de azúcar	Norte Nordeste	143.303	174.934	211.864	232.120
	Centro Sur	74.421	126.939	193.626	207.453
	Brasil	217.724	301.873	405.490	439.573
Producción de bioetanol	Norte Nordeste	25.730	28.244	26.342	31.829
	Centro Sur	42.408	66.856	80.815	96.534
	Brasil	68.138	95.100	107.157	128.363
Todas	Brasil	642.848	764.593	900.768	982.604

Fuente: Moraes (2005).

Gráfico 35 – Productividad promedio de los trabajadores de la agroindustria de caña en Brasil



Fuente: Moraes (2005).

La relación entre los niveles de empleo en la cosecha y en la entre cosechas es denominada coeficiente de estacionalidad y permite cuantificar cuanto de la demanda de empleo es variable a lo largo del año. La estacionalidad de los empleos en la agroindustria de la caña se está reduciendo debido a la extensión de las cosechas y la mayor mecanización. Los valores en São Paulo pasaron de 2,2 en 1980 a 1,8 a fines de los años ochenta y alcanzaron 1,3 a mediados de los 90 [Macedo (2005a)]. Como referencia, el coeficiente de estacionalidad en el cultivo del arroz es de 7, el de frijol entre 3 y 4,5, el de la naranja es de 7,8, el de la soja se ubica entre 3,5 y 12 y el del algodón alcanza 40. Estos datos muestran que la distribución del empleo a lo largo del tiempo es más desigual en esos cultivos que en el caso de la caña [Leite (1990)].

Además de la cantidad de puestos de trabajo demandados, también es muy importante su calidad. En este sentido, es interesante revisar el trabajo de Balsadi (2007) sobre la evolución de la calidad del empleo en la agricultura brasileña entre 2001 y 2004, en los principales cultivos y diferentes tipos de relaciones de trabajo. Según los datos proporcionados por PNDA, para definir índices cuantitativos y realizar una evaluación objetiva de la calidad de los empleos, se adoptaron como variables el nivel educacional de los empleados, el grado de formalidad del empleo, el rendimiento recibido por el trabajo principal y la ayuda recibida por los empleados. Sus conclusiones indican mejoras importantes en diversos índices socioeconómicos para los trabajadores del cultivo de la caña de azúcar en Brasil en los últimos años:

- aumento del nivel de formalidad en el empleo, con un elevado porcentaje de trabajadores con prestaciones sociales (permite el acceso a la jubilación y otros derechos, como pago de horas extras y asistencia médica), lo que vuelve el cultivo de la caña de azúcar una de las actividades con mayor nivel de formalidad en el trabajo rural;
- ganancias reales de sueldos entre 1992 y 2005, de 34,5% para los empleados permanentes con residencia urbana, de 17,6% para los permanentes rurales, de 47,6% para los trabajadores temporarios urbanos y de 37,2% para los temporarios rurales; y
- aumento y diversificación de los beneficios recibidos por los trabajadores, tales como ayuda para pagar el transporte y alimentación, ayuda para la vivienda en el caso de los residentes rurales y de salud para los empleados permanentes con residencia urbana.

En este estudio también se apuntan, como hechos positivos, la importante reducción del trabajo infantil (participación de sólo el 0,8% en 2004, cuando en Pernambuco, en 1993, el 25% de los cortadores de caña tenían entre 7 y 17 años de edad) y el aumento de la escolaridad de los empleados. Otros investigadores expusieron conclusiones similares, reforzando la importancia de la organización de los trabajadores, de los convenios colectivos laborales y de la legislación laboral como componentes principales en la consecución de estos avances, especialmente en la región centro sur, donde el nivel promedio de escolaridad de los trabajadores en la producción de caña y en la industria de bioetanol, en 2005, era superior a cinco y nueve años, respectivamente. En los mismos casos, el sueldo prome-

dio, en 2005, era U\$S 280,00 y U\$S 509,00, respectivamente, en la producción de caña y de bioetanol [Moraes (2007)].

A pesar de las mejoras alcanzadas, aún existen situaciones adversas, principalmente para los empleados temporales ocupados en la cosecha manual de la caña de azúcar, donde las condiciones de trabajo son mucho más arduas que en la industria y en el que se usa un sistema de pago por volumen de caña cortada. Algunos autores cuestionan este sistema, afirmando que causa situaciones de extremo desgaste de los cortadores de caña [Alves (2006)]. Es un tema polémico. El fin del pago por producción no tiene consenso entre los sindicatos y hay una parte de los trabajadores a favor de su mantención. Como representante de los ingenios, UNICA se opone al fin de este sistema de remuneración, aunque destaca que intenta garantizar el cumplimiento efectivo de las normas vigentes por parte de las industrias, incentivando el pago correcto de los cortadores según lo estipulado en los convenios colectivos laborales [Moraes (2007)].

En este contexto de mayor valoración del trabajador, la agroindustria de la caña pasa por una transición importante, consecuencia de las ganancias en la productividad agroindustrial, asociadas a las innovaciones mecánicas, fisicoquímicas y biológicas, que permiten ampliar la producción manteniendo la demanda de insumos y recursos. Entre estas innovaciones, se destaca la creciente mecanización en la cosecha derivada, a su vez, de la necesidad de eliminar progresivamente la quema de paja durante los próximos años y reducir los costos de la cosecha. Se estima que, en la cosecha 2006/2007, la cosecha mecanizada se ha empleado en el 40% de las plantaciones de caña del centro sur. Se trata de una tendencia creciente, cada año se venden más de 400 cosechadoras, y cada una de estas máquinas realiza el trabajo de 80 a 100 cortadores de caña [CGEE (2007)]. Tarde o temprano, estas innovaciones tecnológicas en la producción de caña se expandirán por otras regiones brasileñas, con evidente impacto en el nivel de empleo. En el período 2000–2005, frente a un incremento del 28,8% de la producción de caña, la expansión del número de empleos fue de un 18%. Se estima que, a partir de 2020, prácticamente no exista más corte manual de caña en São Paulo debiendo reducirse entre 2006 y 2020 de 260 mil a 146 mil trabajadores, incluso con un aumento de 20 mil empleados en la industria [Moraes (2007)].

Para enfrentar estos cambios se plantean dos líneas de acción relacionadas con los trabajadores: por un lado apoyando las actividades económicas alternativas para los trabajadores potencialmente desempleados en sus lugares de origen y, por otro lado se deberá reforzar la preparación de recursos humanos para la agroindustria. Ambas opciones no son triviales, sino que deben ser analizadas con prioridad. El aumento de los requisitos de formación de personal en los ingenios brasileños, en todas sus áreas y en los diversos niveles de responsabilidad, ha motivado una gran demanda de mano de obra especializada. Esos trabajadores se especializan en cursos de nivel medio y superior, directamente relacionados con la producción de caña y bioetanol. Una tercera posibilidad podría ser reducir el ritmo de pérdida de puestos de trabajo de los cortadores de caña, por ejemplo, adoptando innovaciones tecnológicas intermedias, como la Unidad Móvil de Auxilio a la Cosecha (UNIMAC), que reemplaza sólo

una parte de la mano de obra, proporcionando mayor seguridad y comodidad a los trabajadores en el corte de la caña cruda y con recuperación de la paja [Alves (2006)].

Es oportuno señalar que, aunque existan importantes reducciones en la demanda de mano de obra, el bioetanol de caña de azúcar continuará siendo bastante intensivo en trabajo. En la actualidad, por cada unidad de energía, la producción de bioetanol, comparada al carbón mineral, a la hidroelectricidad y al petróleo, necesita respectivamente 38, 50 y 152 veces más trabajo humano [Goldemberg (2002)]. La misma idea es expresada de manera diferente por Leal (2005) quien afirma que, mientras que cada vehículo abastecido con derivados de petróleo requiere una persona-año de trabajo para atender su consumo, la introducción de un 24% de bioetanol como aditivo en la gasolina eleva la demanda de personal a seis personas-año y, en el caso de que se utilice bioetanol hidratado puro, ese mismo vehículo necesitará 22 trabajadores para producir su biocombustible.

Otras características importantes de la bioenergía y en particular del bioetanol son la creación de oportunidades laborales y la distribución entre los trabajadores del valor agregado de la cadena productiva, lo que marca una diferencia importante en relación con otras tecnologías energéticas. Aun con la adopción de tecnologías de alta productividad y el menor impacto sobre la demanda de mano de obra, tendencia aparentemente inexorable, la producción de bioetanol continúa siendo una actividad gran generadora de empleos, cada vez de mayor calidad, con la correspondiente elevación de los requisitos de capacitación y de la remuneración media. Además, es importante reconocer la función relevante de la actividad agroindustrial como generadora de renta y dinamizadora de la actividad económica local y regional, con beneficios indirectos significativos. Las actividades extenuantes y de baja productividad no se deben considerar como inherentes a la bioenergía. La progresiva reducción de la cosecha manual de la caña debe ser vista como un avance deseable en la dirección de una mayor sostenibilidad de esta agroindustria.

El etanol de caña de azúcar y la cuestión de la propiedad

Un aspecto relacionado al papel del bioetanol en la creación de empleos y renta en el medio rural tiene que ver con la concentración de la propiedad asociada a la expansión de su producción. De modo general, este tema se relaciona con uno de los mayores desafíos del desarrollo armónico de la economía brasileña: la compatibilización de las demandas sociales por el acceso a la tierra con la implementación de una base productiva eficiente y competitiva en el medio rural. En el caso de la agroindustria sucroalcoholera, esta cuestión cobra mayor importancia debido a las áreas ocupadas y por el nivel de verticalización existente, pese a la existencia de miles de proveedores de caña y arrendatarios. En efecto, la producción de caña y bioetanol presenta economías de escala, que se incrementa con la progresiva adopción de tecnologías de mayor productividad y la correspondiente dilución de los costos fijos en un mayor volumen de producto. En tales condiciones, en las unidades de mayor capacidad, se observa una efectiva reducción de los costos, justificando el proceso de paulatina concentración de las propiedades, en el marco de la legislación agraria.

Esta tendencia se ve agravada por lo poco atractivas que resultan gran parte de las actividades agropecuarias y la disminución de la actividad económica en algunas regiones, donde el cultivo de caña pasa a ser una de las pocas alternativas viables, considerando sólo los cultivos tradicionales. Como en los aspectos comentados en los párrafos anteriores, corresponde al Estado un papel decisivo, estimulando tanto la producción bioenergética como la de otros productos agropecuarios, preservando la eficiencia económica y los pequeños emprendedores rurales. No parece existir aquí un conflicto sin salida, sobre todo frente a la amplia disponibilidad de tierras y a las perspectivas de los mercados agrícolas, incluyendo alternativas innovadoras de cultivo y cría que permiten una mayor agregación de valor por unidad de producto que la producción bioenergética.

Sin embargo, para preservar la agricultura familiar y su estándar de producción agrícola, se sugiere fomentar la producción de biocombustibles en forma descentralizada y en escalas que permitan el ingreso del pequeño agricultor como un productor de biocombustible con la adopción de prácticas agroecológicas y una eventual reducción de desplazamientos entre las zonas productoras y los centros consumidores. Estas posibilidades aún muestran su viabilidad ya que presuponen modelos productivos bastante diferentes a los practicados en la actualidad. La reducida experiencia en las micro y mini destilerías de bioetanol para producción de mil y cinco mil litros diarios (valores promedio) respectivamente, no permite asegurar que constituyan una alternativa a ser promovida, requiriéndose una visión innovadora en la tecnología de producción del bioetanol de caña de azúcar. En este sentido, un punto importante es la necesidad de articular la producción de bioetanol con otras actividades agropecuarias, de forma de compensar la baja productividad, característica inherente a estas unidades, con sistemas de extracción, fermentación y destilación simplificados, presentando productividades en torno a 40 litros de bioetanol por tonelada de caña procesada, cerca de la mitad del valor observado en plantas de mayor tamaño [Horta Nogueira (2006b)]. Una posibilidad a explorar es asociar la producción de bioetanol con la ganadería bovina, que podría utilizar como alimento el bagazo disponible durante la cosecha. De todas maneras, los sistemas más eficientes de producción de bioetanol de caña de azúcar tienen lugar en escalas industriales y posiblemente las cooperativas de productores asociadas a plantas convencionales sean una alternativa más consistente que las pequeñas unidades productoras.

Volviendo al tema de la concentración económica y sus implicaciones, es necesario observar que la agroindustria del bioetanol, como se desarrolla en Brasil, se podría considerar concentradora, al ser comparada con otras actividades agropecuarias. Pero si comparamos el bioetanol con otras actividades de carácter energético, podemos concluir que es una industria altamente descentralizada, con millares de proveedores y con los grupos industriales más importantes que no alcanzan a controlar el 10% de la capacidad total de producción. Efectivamente, la descentralización es una característica inherente a la bioenergía, que necesita amplios espacios para captar la energía solar.

Efectos producidos en otros sectores de la economía

La amplia articulación de la agroindustria del bioetanol con otros sectores económicos, antes y después de la producción y del procesamiento de la caña de azúcar, distribuye los beneficios generados de un modo bastante interesante. Un estudio que usa un modelo expandido de matrices insumo-producto muestra que toda la economía nacional tiende a expandirse con el crecimiento de la producción de bioetanol [CGEE (2005)]. Además, naturalmente, de la expansión de los sectores productores de caña de azúcar y etanol y computando los efectos indirectos e inducidos, son favorecidos los sectores de productos químicos diversos (incluyendo los fertilizantes), de refinación de petróleo, comercio, logística y alquileres de inmuebles.

Este estudio, utilizando una matriz ajustada para 2002, estima que para cada millón de metros cúbicos de bioetanol de capacidad anual de producción puesto en producción, son agregados R\$ 119 millones por año debido a las inversiones; durante la operación se generan casi R\$ 1,46 mil millones por año, computandose los efectos directos, indirectos e inducidos [CGEE (2005)]. Extendiendo este estudio a las condiciones observadas en el centro sur brasileño, se estimó que el procesamiento de un millón de toneladas de caña para la producción de bioetanol corresponde a un incremento de R\$ 171 millones en la producción de la economía y la creación de 5.683 empleos, considerando también los efectos directos, indirectos e inducidos, como se muestra en la Tabla 34.

Tabla 34 – Impactos directos, indirectos e inducidos del procesamiento de un millón de toneladas de caña de azúcar para la producción de alcohol

Sector	Valor de la producción (R\$ millón)	Valor agregado (R\$ millón)	Empleos
Caña de azúcar	44,5	20,8	1.467
Resto de la agropecuaria	14,3	8,1	697
Azúcar	8,0	2,7	31
Alcohol	97,8	38,9	211
Electricidad	6,8	7,3	37
Extractiva mineral	0,3	0,2	4
Siderurgia, minería y metalurgia	7,1	2,1	48
Máquinas, vehículos y piezas	9,3	4,2	51
Petróleo y gas	29,5	12,1	12
Sector químico	13,9	4,7	41
Alimentos	15,4	3,1	93
Construcción civil	1,3	0,8	23
Resto de la transformación	16,8	5,7	287
Comercio y servicios	81,3	53,0	2.679
Familias	–	7,3	–
Total	346,3	171,0	5.683

Fuente: Scaramucci y Cunha (2008).

7.5 Certificación y sostenibilidad en la agroindustria del bioetanol

Como una de las formas de asegurar el cumplimiento de los criterios de sostenibilidad en la producción de bioetanol y biodiésel, han sido propuestos, principalmente por países industrializados, sistemas de certificación para asegurar que los biocombustibles se produzcan y se distribuyan de modo sostenible, pudiendo ser utilizados con propósitos ambientales.

El establecimiento de criterios y patrones de sostenibilidad ampliamente aceptados enfrenta como dificultad básica la inherente complejidad de los sistemas bioenergéticos, con su gama de materias primas, tecnologías y contextos de producción. Los sistemas de certificación para biocombustibles, de carácter voluntario u obligatorio, aún no cuentan con una estructura legal internacional que los sustente, aunque estos sistemas pudieran llegar a ser utilizados en el ámbito de los compromisos de mitigación del cambio climático, protección a la biodiversidad y tratados comerciales.

La certificación es, típicamente, una exigencia planteada por los consumidores a los productores. De este modo, la concepción de sistemas de certificación impone un tratamiento objetivo y cuidadoso de los aspectos de sostenibilidad, y su implementación implica, la existencia de agentes de monitoreo independientes que aseguren el equilibrio y la imparcialidad imprescindibles. No es despreciable el riesgo de que sistemas de certificación mal diseñados sirvan como barreras comerciales adicionales y actúen como medidas proteccionistas, restringiendo el espacio para alternativas efectivamente sostenibles y privilegiando bioenergías ineficientes. Otra preocupación, por parte de los productores, es el costo de los sistemas de certificación, que puede inviabilizar la producción en pequeña escala.

A continuación se presentan los principales esfuerzos actualmente en curso para evaluar y eventualmente certificar la sostenibilidad de los biocombustibles (GBEP, 2007):

- En enero del año 2007, la Comisión Europea estableció como meta (no obligatoria) introducir, hasta 2020, una proporción de 10% de biocombustibles (etanol y biodiésel) en los combustibles utilizados para el transporte en cada país miembro. Para ello se deberá adoptar un sistema de evaluación de sostenibilidad, actualmente en desarrollo.
- Asociado al requerimiento de una proporción del 5% de combustible de origen renovable en todo el combustible automotor vendido en el Reino Unido en el año 2010, de acuerdo a lo establecido en la Renewable Transport Fuel Obligation (RTFO), los productores de biocombustible deberán informar el balance de gases de efecto invernadero y el impacto ambiental de sus productos (The House of Commons, 2008).
- A inicios de 2006 se desarrolló en Holanda una propuesta sobre los criterios de sostenibilidad para la bioenergía, con actividades planeadas para verificar proyectos

piloto y definir sistemas de monitoreo y certificación. Un extenso ejercicio sobre los posibles indicadores presenta un juicio favorable al bioetanol producido en Brasil, particularmente en el estado de São Paulo [Smeets et al. (2006)].

- Recientemente, se revisó en Alemania toda la legislación que fomenta a los biocombustibles, incluyendo exigencias obligatorias de cumplimiento de criterios de sostenibilidad, con relación a la materia prima, protección del habitat natural y reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero.
- En el marco del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (Unep), se discute la definición de criterios de sostenibilidad en el caso de los biocombustibles. Se sugiere la adopción de metas concretas e instrumentos para su implementación. En este sentido, UNEP trabaja en estrecha colaboración con instituciones gubernamentales, entidades privadas y representantes de la sociedad civil, incluyendo el Global Bioenergy Partnership y la Roundtable on Sustainable Biofuels, que más adelante serán analizados [Unep (2008)].
- La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) está desarrollando el proyecto “Seguridad Alimentaria y Bioenergía” (Bioenergy and Food Security), con el fin de establecer un andamiaje analítico para la evaluación de los impactos sobre el suministro alimentario, determinados por la expansión de la producción de bioenergía. Se consideran los sistemas basados en productos alimentarios y los denominados sistemas bioenergéticos de segunda generación [BFS/FAO (2008)].
- La FAO y la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial, (UNIDO) preparan un proyecto para el Fondo Mundial para el Medio Ambiente (Global Environment Facility – GEF), con el propósito de orientar a los países sobre las condiciones ambientales y socioeconómicas para la producción, la conversión y el uso sostenible de los biocombustibles.
- La Mesa Redonda sobre Biocombustibles Sostenibles (Roundtable on Sustainable Biofuels - RSB), liderada por el Centro de Energía de la Escuela Politécnica Federal de Lausanne, de Suiza, es una iniciativa internacional que involucra agricultores, empresas, organizaciones no gubernamentales, especialistas, agencias internacionales y de gobierno interesados en garantizar la sostenibilidad de la producción y de la conversión de los biocombustibles. En este sentido, se promueven una serie de reuniones, teleconferencias y debates buscando construir un consenso en lo que atañe a los principios y criterios en la producción de biocombustibles sostenibles. Los principios considerados para la evaluación de la sostenibilidad en la producción de los biocombustibles están disponibles para su análisis [Frie et al. (2006) y EPFL (2008)].
- El grupo de trabajo internacional IEA Task 40, en el marco del Acuerdo de Bioenergía de la Agencia Internacional de la Energía, desarrolla actividades relacionadas con el

comercio internacional de biomasa y bioenergía, sus implicaciones y perspectivas. Trabajan, específicamente, en el desarrollo de sistemas de certificación, estandarización y terminología para la promoción del comercio internacional de vectores bioenergéticos con bases sostenibles, proporcionando análisis e informaciones importantes sobre los esfuerzos realizados en este campo [IEA Bioenergy (2008)].

- Los gobiernos de Brasil, Estados Unidos y de los países de la Unión Europea, principales productores mundiales de biocombustibles y miembros del Forum Internacional de los Biocombustibles (International Biofuels Forum – IBF) divulgaron, en febrero del año 2008 el Livro branco sobre especificações de biocombustíveis internacionalmente compatíveis (Libro blanco sobre especificaciones de biocombustibles internacionalmente compatibles), con un análisis de las actuales especificaciones, conducida por un grupo de especialistas internacionales, con el objetivo de promover la expansión del comercio de estos productos. Los esfuerzos iniciales son para desarrollar procedimientos, sistemas y materiales de referencia para pruebas de calidad en bioetanol y biodiésel, incluso para permitir, mediante métodos analíticos, determinar si un combustible proviene de fuentes renovables [NIST (2008)].

El sector privado del área de combustibles, especialmente de los países europeos, considera que la sostenibilidad es un factor muy importante en el desarrollo de la bioenergía. Algunas empresas han desarrollado procedimientos propios que aseguran la adquisición de productos sostenibles. Sin embargo, la mayor parte de las empresas interesadas en adquirir y vender biocombustibles sostenibles están procurando involucrarse en procesos con participación más plural, que son vistos como más legítimos por parte de los consumidores. Por ejemplo, BP, DuPont, Petrobras y otras grandes empresas participan en la *Roundtable on Sustainable Biofuels* (RSB). En el caso de otros productos de origen agrícola, como son la madera, la soya y el aceite de palma, también se implementan sistemas de certificación de sostenibilidad.

La última iniciativa a mencionar, con el objetivo de asegurar niveles de sostenibilidad en la producción de bioetanol, es el Protocolo Agroambiental, firmado en 2006 por el gobierno del estado de São Paulo y UNICA, que implementó el Programa Bioetanol Verde. Este programa fomenta las buenas prácticas del sector sucroalcoholero, por medio de un certificado de conformidad y pretende determinar un patrón positivo a ser seguido por los productores del estado. Se encuentra en fase de funcionamiento y aplicación a gran escala en todo el estado y cubre algunos de los principales puntos de reducción de impactos de los cultivos, como la anticipación de los plazos de eliminación de la quema de la paja de la caña de azúcar, la protección de nacientes y de remanentes forestales, el control de la erosión y la adecuada gestión de los envases de agrotóxicos [Lucon (2008)].

Los sistemas de certificación de la sostenibilidad con este perfil, adecuadamente diseñados y bien implementados, podrán servir como efectivos instrumentos para que la producción de los biocombustibles se desarrolle en un marco deseable de racionalidad, como la producción de bioetanol ha demostrado que puede lograr, competitivamente.



Capítulo 8

Perspectivas para un mercado mundial de biocombustibles

Distintos países están demostrando interés por el desarrollo de la producción y el uso de bioetanol. Existe interés, tanto en satisfacer sus propias necesidades energéticas (especialmente como combustible líquido en el sector transporte), como también en el eventual desarrollo de un mercado mundial, que relacione países que puedan producir este biocombustible de forma sostenible, con países potencialmente importadores, de manera ventajosa para ambos. Aunque aún incipiente, este mercado crece, debido a las demandas por un combustible renovable y apropiado para el medio ambiente. El potencial del bioetanol de caña de azúcar presenta perspectivas interesantes para el desarrollo de ese mercado, debido a sus posibilidades para cumplir tales criterios de sostenibilidad. Este capítulo analiza las condiciones para que el bioetanol de caña se transforme en un producto global, tomando como base su oferta y demanda, presentes y futuras, así como las políticas y tendencias relacionadas con su producción y su comercialización.

Aunque el énfasis del libro es en bioetanol, se analizará en este capítulo el contexto general de los biocombustibles, incluyendo alguna información sobre el biodiésel. El capítulo inicia presentando una estimación del potencial para la producción bioenergética, seguida de una revisión de los datos actuales y las perspectivas para la oferta y la demanda de bioetanol, y de un análisis del escenario de políticas y estrategias dirigidas a la producción y al uso de biocombustibles, temas fundamentales para que los mencionados potenciales y las expectativas de mercados se desarrollen. Además, se analizan las interrelaciones entre la seguridad alimentaria y la producción de biocombustibles y se comentan factores que inducen la creación de un mercado global de bioetanol, relacionados con los desafíos ambientales y el refuerzo del comercio internacional de productos agrícolas.

8.1 Potencial global para la producción de biocombustibles

Se han realizado distintos estudios para aclarar una de las principales preguntas relacionadas con el futuro de los biocombustibles y del bioetanol en particular: ¿En qué cantidad y dónde se los podrá encontrar? No es una pregunta simple de responder ya que el potencial de oferta de los biocombustibles no es un número absoluto e inmutable, como podría ser en el caso de una reserva mineral, sino una valor dinámico, que depende de escenarios geográficos, económicos y políticos y de las tecnologías de producción y conversión, las cuales se transforman permanentemente. Por ejemplo, en el caso de que surjan propuestas de producción de biodiésel con algas marinas, ¿cómo se podrá estimar su potencial de producción?

Además, los recursos naturales dedicados a los cultivos energéticos, como pueden ser la tierra y el agua, existen de forma limitada y también deben ser utilizados para producir alimentos (para personas y animales) e insumos industriales (fibras textiles, madera para celulosa y otros fines etc.), así como para proteger la naturaleza, entre otras funciones. La complejidad de este tema aumenta debido a su relación tan próxima con la oferta de alimentos, hecho que vuelve indispensable el conocimiento del potencial sostenible de la producción, de la conversión y del uso de biocombustibles frente a las preocupaciones por la seguridad alimentaria.

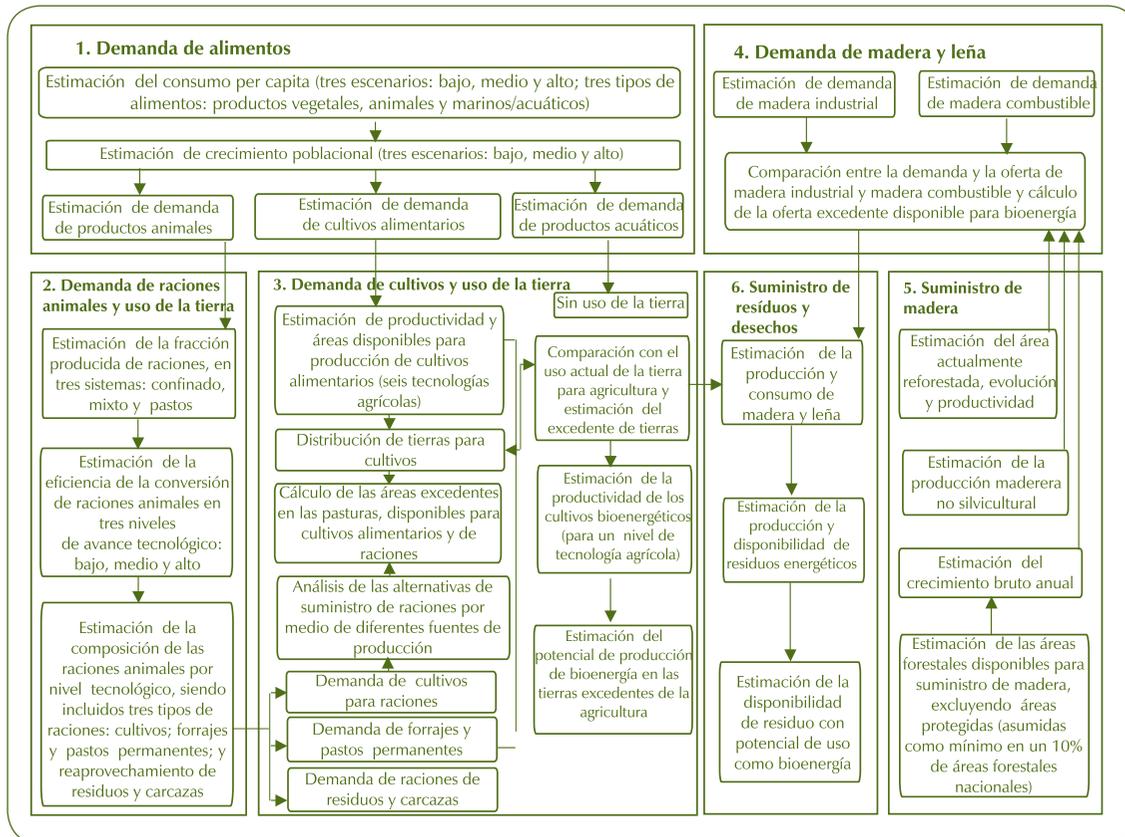
Por lo tanto, se hace necesario establecer los límites y las fronteras para la producción de biocombustibles y, sobre todo, considerar criterios de sostenibilidad, tareas bastante complejas. Para enfrentarlas, como veremos más adelante en este capítulo, se han desarrollado modelos analíticos y computacionales, capaces de modelar y simular los impactos de esta relación, destinados a evaluar políticas y ayudar en las tomas de decisión para el diseño de programas bioenergéticos. En la figura 30 se presenta una visión de la amplia red de relaciones que debe ser considerada entre las demandas agrícolas y forestales y las bioenergías, según el modelo sugerido Smeets et al. (2006).

Algunos estudios preliminares sobre la disponibilidad de biomasa [Berndes et al. (2003)] concluyeron que, en el año 2050, la contribución de la biomasa a la oferta global de energía podrá variar de 100 EJ/año a 400 EJ/año, lo que significa entre 21% y 85% del actual consumo total de energía en el planeta, estimado en 470 EJ. Las interacciones entre el sector bioenergético en expansión y otros usos de la tierra, como la producción de alimentos, protección a la biodiversidad, conservación del suelo y de la naturaleza y secuestro de carbono, fueron recientemente evaluadas en algunos estudios.

En uno de los trabajos más conocidos [Smeets et al. (2006)] se utiliza un abordaje *de abajo hacia arriba* para procesar informaciones sobre el uso de la tierra, sistemas de producción agrícola, proyecciones de demanda de alimentos e informaciones sobre posibles avances en la gestión agrícola (tanto para cultivos como para la producción de carnes y lácteos). Estudios recientes clasifican la biomasa usada para producir energía en tres categorías: plantaciones energéticas en tierras cultivables, producción de biomasa en tierras marginales y residuos de

agricultura y silvicultura, estiércol y otros residuos orgánicos [Junginger et al. (2007)]. Tomando como base el enfoque descrito en la Figura 30, se estima que, en todo el mundo, esas tres categorías podrían abastecer 200 EJ, 100 EJ y 100 EJ, respectivamente, lo que correspondería al límite superior indicado antes, de 400 EJ.

Figura 30 – Visión general de los elementos principales usados en la metodología de la evaluación del potencial bioenergético

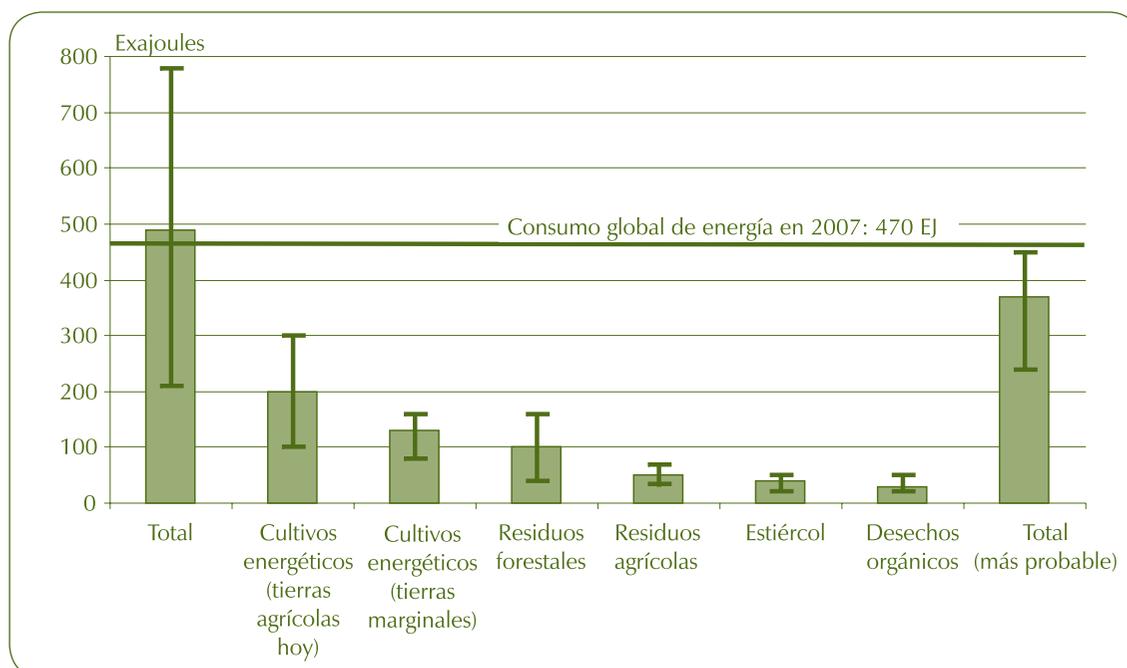


Fuente: Smeets et al. (2006).

No es trivial determinar un valor que represente el potencial global de producción de bio-combustibles. Confirmando esta afirmación, el Gráfico 36 muestra los rangos de variación de la oferta de biomasa para fines energéticos, resultantes de distintos enfoques y métodos: la oferta potencial total varía entre 205 EJ y 790 EJ [Juergens (2007)]. En la figura también se muestra la demanda global de energía estimada para el año 2007. La principal razón de las variaciones observadas entre los límites superiores e inferiores es la gran incertidumbre que existe entre la disponibilidad de tierras y los niveles de productividad, los dos parámetros más críticos para las evaluaciones de potencial. Además, las futuras expectativas de oferta de biomasa, provenientes de bosques, de residuos agrícolas y de la silvicultura varían significativamente en los distintos estudios, como se verá a continuación.

La Tabla 35 muestra una evaluación del potencial técnico de los biocombustibles, en función de cuatro sistemas de producción agrícola hipotéticos, considerando, esencialmente, cultivos energéticos y residuos agrícolas y de silvicultura. En este análisis no se consideraron el sebo ni otros subproductos grasos con potencial bioenergético. La principal restricción, en cada uno de los escenarios, es que no se produzca escasez de alimentos. Con relación a la demanda alimentaria, estos estudios utilizaron como referencia básica los datos nacionales publicados en el Balance Alimentario de la FAOSTAT (Food Balance Sheets – FBS) [FAO (2003)].

Gráfico 36 – Potencial bioenergético por tipo de biomasa



Fuente: Juergens (2007).

En la Tabla 35, los primeros tres escenarios de sistemas productivos comparten la hipótesis de un crecimiento medio de la población humana global, entre los años 1998 y 2050 (de 5,9 mil millones a 8,8 mil millones de personas) y una evolución del consumo *per capita* de alimentos medio (de 2,8 Mcal a 3,2 Mcal al día por persona), con perspectivas de establecimiento de vastas plantaciones (de 123 millones a 284 millones de ha) y un alto nivel tecnológico para la producción de cultivos energéticos. Analizando las mismas condiciones de demanda, el cuarto escenario incorpora la hipótesis de que los esfuerzos en investigación y desarrollo podrían aumentar los rendimientos más allá del nivel tecnológico utilizado en el escenario 3. Esto podría dar como resultado cosechas 25% mayores, gracias a los avances tecnológicos. El sistema de producción agrícola es el que determina los requerimientos de área para cultivo de alimentos, incluyendo las necesidades de alimentación animal y, en consecuencia, el volu-

men de residuos de cosecha que será generado. En el caso particular del escenario 3, este se apoya en un sistema de cría de animales sin el uso de pastos, en el cual toda la alimentación animal proviene de cultivos y residuos agrícolas. Los escenarios 1 y 2 se basan en un sistema de producción mixta, en el cual una gran parte de la alimentación animal proviene de pastos. La producción de residuos de cosechas, a partir de cultivos de alimentos humanos y animales es, en consecuencia, el punto alto del sistema 3. Las pequeñas diferencias entre la producción de residuos en los sistemas 1 y 2 se originan a causa de los distintos destinos de producción de los cultivos. El sistema de producción también determina el nivel de avance de la tecnología agrícola e influye en la fracción generada de residuos de cosechas.

Tabla 35 – Potencial total técnico de producción de bioenergía para diversas regiones y escenarios productivos en 2050 (EJ por año)

Región	Escenario productivo			
	1	2	3	4
Latinoamérica y el Caribe	89	162	234	281
Norteamérica	39	75	168	204
África Subsahariana	49	117	282	347
Norte de África y Medio Oriente	2	2	31	39
Europa Occidental	13	19	25	30
Europa del Este	5	13	24	29
Comunidad de los Estados Independientes (CEI) y Países Bálticos	83	111	223	269
India y Sur Asiático	23	26	31	37
Asia Oriental	22	28	158	194
Japón	2	2	2	2
Oceanía	40	55	93	114
Total	367	610	1.273	1.548

Fuente: Smeets et al. (2006).

Este estudio hizo posible constatar que el mayor potencial para la producción de cultivos energéticos se encuentra en la zona de África Subsahariana y en la región de América Latina y el Caribe, que en el escenario productivo 4 alcanzan producciones anuales de 317 EJ y 281 EJ, respectivamente. Ambas regiones poseen áreas agrícolas no utilizadas y ecológicamente adecuadas para la producción de cultivos energéticos, en particular la caña de azúcar. Asia Oriental también posee un potencial considerable para la producción de cultivos, de 147 EJ anuales en el escenario productivo 4. Entre los países industrializados, la región de la Comunidad de los Estados Independientes y de las naciones bálticas, Norteamérica y Oceanía presentan los potenciales más significativos. Regiones áridas, con tierras de menor productividad o limitaciones de área, como Japón, Asia Meridional y Norte de África y Medio Oriente

poseen potencial cero o muy reducido. En América Latina y el Caribe es bastante importante el impacto de la tecnología adoptada en la producción animal, así como la disponibilidad de área agrícola para el desarrollo de los biocombustibles. Como lo demuestran los escenarios productivos analizados, productos como carne, leche y huevos son mucho más intensivos en relación al uso de la tierra por unidad de producto que la producción agrícola [FAO (2003)].

Los resultados de este estudio son bastante optimistas en lo que se refiere al impacto de la producción bioenergética en la producción de alimentos. Una conclusión importante es que el potencial global anual de bioenergía producida, estimado para el año 2050, corresponde a 78% (Escenario 1), 129% (Escenario 2), 270% (Escenario 3) y 329% (Escenario 4) de la demanda energética observada en 2005, sin afectar la producción alimentaria. La mayor parte de este potencial es generada por cultivos energéticos especializados desarrollados en tierras agrocultivables excedentes, que dejan de ser necesarias para la producción de alimentos. Recordemos que la disponibilidad de tierras agrocultivables excedentes entre los varios sistemas depende, principalmente, de la eficiencia con que los alimentos de origen animal son producidos. En esos casos, los residuos, inclusive los desechos urbanos, son responsables por 76 EJ a 96 EJ anual. Los autores citan otras estimaciones publicadas en la literatura científica [Hogewijk et al. (2003) y Wolf et al. (2003)], que parecen confirmar los resultados alcanzados.

La Tabla 36 muestra el potencial global de producción de bioenergía, indicando las condiciones generales para alcanzar tales niveles de producción. En esa tabla se proporcionan dos intervalos de variación para el potencial bioenergético, dependiendo de cada contexto productivo: a) potencial promedio bajo condiciones normales y con las proyecciones actuales de progreso técnico; y b) potencial promedio en un mundo que busca la utilización de la biomasa en gran escala. Un límite inferior igual a cero significa que el potencial disponible puede ser nulo; eso sucede en el caso de que no se pueda modernizar la agricultura, lo que impondría mayor demanda de tierras para alimentar a la humanidad.

En el caso particular de los biomateriales, el potencial bioenergético asociado podría ser incluso negativo, ya que una alta demanda de biomasa para la fabricación de productos como bioplásticos o materiales de construcción puede reducir la disponibilidad de biomasa para la producción de energía. Sin embargo, cuanto más se utilicen los biomateriales habrá más subproductos y residuos orgánicos al final del ciclo de vida de estos productos, los cuales pueden utilizarse para la producción de energía (véase Capítulo 5). Ese uso de la biomasa resultará ser un beneficio “doble” con relación a los gases de efecto invernadero, evitando emisiones durante la fabricación de materiales a base de combustibles fósiles y por medio de la producción de energía más limpia. La oferta anual de energía procedente de biomateriales que terminan como residuos puede variar entre 0 EJ y 50 EJ. Este intervalo de variación excluye el efecto cascada (usos sucesivos) y no tiene en cuenta la brecha de tiempo entre la producción del material y su utilización final como combustible [Faaij y Domac (2006)].

Tabla 36 - Potencial de diversas materias primas y sistemas productivos para bioenergía

Contexto de producción de bioenergía	Principales hipótesis y observaciones	Oferta potencial bioenergética 2050 (EJ/año)	
		Escenario normal	Escenario optimista
Producción de energía en tierras agrocultivables hoy	Área requerida – pesimista: 0 Gha a 4 Gha; optimista: 1 Gha a 2 Gha. Una producción bioenergética elevada exige una adaptación estructural de los sistemas de producción agrícola. Se asumió una productividad anual de 8 a 12 ton de biomasa seca/ha, con expectativas de mayor productividad en suelos más fértiles	0 a 700	100 a 300
Producción de biomasa en tierras marginales	En escala global, el área máxima a ser utilizada sería de 1,7 Gha, con baja productividad, 2 a 5 ton de biomasa seca/ha/año (38 GJ/ha.año a 95 GJ/ha.año). La oferta puede ser limitada por el escaso desempeño económico o por la competencia con la producción de alimentos	0 a 150	60 a 150
Biomateriales	Área de cultivo necesaria para satisfacer la demanda global de biomateriales: 0,2 Gha a 0,8 Gha (productividad promedio: 5 ton de biomasa seca/ha por año). Si las tierras marginales y la silvicultura fueran capaces de satisfacer esta demanda, la demanda de tierras agrocultivables sería nula	0 a 150	40 a 150
Residuos agrícolas	Estimaciones tomadas de varios estudios. El potencial depende de índices de producción y del tipo de sistema de producción: los sistemas intensivos permiten mayor utilización de residuos que los extensivos	15 a 70	
Residuos forestales	El potencial bioenergético sostenible de los bosques del mundo es poco conocido. El valor superior se le atribuye al potencial técnico que incluye los residuos de procesamiento	0 a 150	30 a 150
Estiércol	Utilización de estiércol seco. Estimación inferior basada en el uso actual y estimación superior fundamentada en el potencial técnico. El uso a largo plazo es incierto	0 a 55	5 a 55
Residuo orgánico	Este análisis se realizó según estimaciones basadas en datos de la literatura. Depende, en gran medida, del desarrollo económico, del consumo y del uso de biomateriales. Los números incluyen la fracción orgánica de los residuos urbanos y restos de madera. Valores mayores son posibles en el caso de un uso más intensivo de biomateriales	5 a 50	
Total	En un escenario más pesimista, no hay disponibilidad de tierras para la producción de energía, sólo se consideran los residuos. En el escenario más optimista, la agricultura intensiva utiliza suelos de alta calidad	40 a 1.100	250 a 500

Fuente: Faaij y Domac (2006).

Con relación al uso del suelo y su impacto en la disponibilidad de tierras para la agricultura, un informe de la Agencia Internacional de Energía [IEA bioenergía (2007)] indica como real la expectativa de que la contribución de la bioenergía aumente considerablemente, desde los niveles actuales de 40 EJ a 55 EJ por año, hasta un aporte esperado entre 200 EJ y 400 EJ anual a finales de siglo. En función de algunos datos de aceptación general, el informe afirma que un tercio de esta energía podría ser suministrado por residuos y basura, un cuarto por la regeneración de tierras degradadas o marginales y el resto por tierras agroclivables y pastos actuales. De esto se concluye que casi mil millones de hectáreas en el mundo pueden ser utilizadas en la producción de biomasa para fines energéticos, incluyendo 400 millones de tierras arables y pasturas y un área mayor de tierras marginales y degradadas, lo que significa alrededor del 7% de la superficie terrestre y menos del 20% de la tierra usada actualmente para la producción agrícola.

Otros informes [Best et al. (2008)] demuestran que, de los 13,2 mil millones de hectáreas del área total de tierras agrícolas globales, 1,5 mil millones de hectáreas son usados para producir cultivos y 3,5 mil millones de hectáreas se usan para ganado de corte, lácteos y producción de lana. Los cultivos usados actualmente para el fin específico de producción de biocombustibles, como resultado de la selección de agricultores, utilizan sólo 0,025 mil millones de hectáreas. En Brasil, por ejemplo, más de la mitad de la demanda total de gasolina es abastecida por el etanol producido en el 1% de los 320 millones de hectáreas de tierras arables y pasturas, ninguna de ellas en la selva amazónica.

Es interesante observar que, además de la producción de biocombustibles, los cultivos utilizados en la producción de energía también suministran, con frecuencia, productos como forraje animal, fertilizantes y bioelectricidad en volúmenes significativos. En este sentido, en los capítulos anteriores se presentó la diversidad de co-productos de la caña de azúcar, simultáneos al bioetanol, en las condiciones actuales y prospectivas.

Para concluir, se puede afirmar — aunque las metodologías y herramientas para la evaluación detallada del potencial global para producción sustentable de biocombustibles estén aún en su etapa de desarrollo, y los datos sobre disponibilidad de biomasa para fines energéticos no estén disponibles a nivel nacional — que en muchos países existe, en escala global, un potencial bioenergético grande e inexplorado, especialmente para la producción de biocombustibles. Algunas conclusiones preliminares relevantes son las siguientes: a) el potencial de oferta de bioenergía depende, en gran medida, de los estándares de producción de alimentos, y en particular de los requisitos de área para la cría de animales; b) algunas regiones presentan clara ventaja comparativa; y c) el potencial total disponible es, según premisas optimistas, de la misma magnitud que la demanda energética global. La siguiente sección intenta presentar cómo este potencial está siendo explotado en el caso de los biocombustibles.

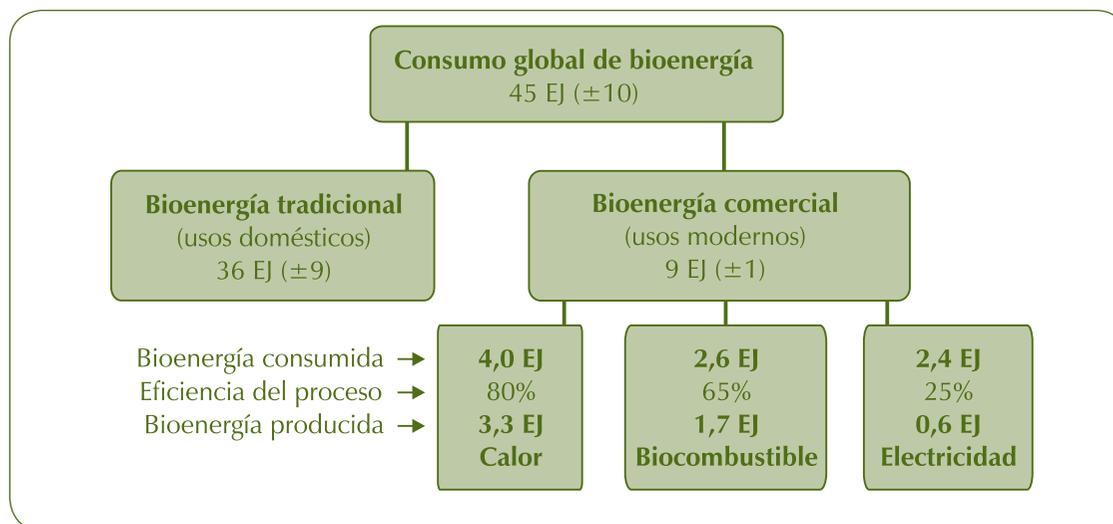
8.2 Oferta y demanda de biocombustibles: escenario actual

Dado que la mayoría de los países posee algún nivel de recursos potenciales de bioenergía, ella se vuelve una de las alternativas más distribuidas de oferta energética en la actuali-

dad. De hecho, la biomasa es la fuente de energía renovable con la mayor cantidad posible de aplicaciones energéticas, que incluyen la producción de electricidad, el suministro de calor en industrias y hogares, y el abastecimiento de vehículos automotores. En ese contexto, los biocombustibles, una forma de bioenergía, pueden cumplir un papel importante en el abastecimiento de la demanda global de energía. A continuación se presentan datos relacionados con la actual contribución de los biocombustibles para la matriz energética mundial, considerando los principales mercados y las condiciones particulares de oferta de bioetanol.

En escala global, la Figura 31 muestra la contribución de la bioenergía a la oferta primaria y secundaria global de energía (después de las conversiones en otras formas energéticas), en el año 2007. Como fuentes de calor se destacan la leña y el bagazo de caña; entre los biocombustibles líquidos se incluyen el bioetanol y el biodiésel; y para la generación de electricidad se utiliza la leña (inclusive como lixiviado celulósico en las fábricas de papel y pulpa) y el bagazo de caña, considerando también los sistemas de cogeneración. El calor rechazado en los sistemas termoeléctricos se utiliza en algún proceso químico, produciendo un importante ahorro energético.

Figura 31 – Contribución de la bioenergía a la oferta primaria y secundaria de energía en el año 2007



Fuente: Best et al. (2008).

Los biocombustibles líquidos, en especial el etanol producido de la caña de azúcar y de maíz y otros cereales y, en escala bastante menor, el biodiésel producido de granos y palmáceas, representan apenas un 1,7 EJ (alrededor del 1,5%) del uso de combustibles para transporte en el mundo. El interés global en el uso de esos biocombustibles crece, en especial en el transporte, sobre todo en Europa, Brasil, Norteamérica y Asia (a mayor escala en Japón, China e India) [IEA (2004)]. Desde el año 2000, la producción global de etanol casi se triplicó, mien-

tras que la producción de biodiésel, partiendo de una base bastante menor, se expandió cerca de tres veces. Por otro lado, la producción de petróleo aumentó sólo un 7% desde el año 2000, y de acuerdo con algunos analistas deberá alcanzar su máxima producción en algunos años. Frente a ese escenario de relativo estancamiento de la producción petrolera, los biocombustibles demostraron una vigorosa expansión: en 2007, la producción de etanol y de biodiésel se presentó un 43% arriba de la producción observada en 2005. En esos niveles, la producción de etanol en 2007 representó alrededor del 4% de los 1,3 mil millones de litros de gasolina consumidos anualmente en todo el mundo [REN21 (2008)].

Es interesante observar que, en 2006, los biocombustibles líquidos fueron responsables por un poco más del 1% de la energía mundial renovable y poco menos del 1% de la oferta anual de petróleo bruto, evaluada en 4,8 billones de litros (aproximadamente 83 millones de barriles diarios). Este escenario podría cambiar de forma muy acelerada en la mayoría de los grandes países consumidores de energía, debido a la adopción de políticas que apuntan a una utilización mucho mayor de biocombustibles para la próxima década [ESMAP (2005)]. En función del lugar de producción y de la materia prima utilizada, los principales biocombustibles líquidos en la actualidad, pueden clasificarse, a *grosso modo*, en tres grandes grupos: bioetanol de caña de azúcar (en Brasil), bioetanol de maíz (en los EEUU) y biodiésel de colza (en Alemania). En un segundo plano está la producción de bioetanol de remolacha y trigo en Europa. La producción de biocombustibles todavía está concentrada en unos pocos países: En los últimos años, Brasil y los Estados Unidos produjeron, conjuntamente, el 90% de etanol, mientras que Alemania fue responsable por el 50% de la producción global de biodiésel [Martinot (2008)].

Un estudio realizado por *Global Bioenergy Partnership* (Asociación Global de Bioenergía) [GBEP (2007)] evaluó las tendencias para biocombustibles en el grupo de los países G8+5, que involucra algunos de los más activos en el escenario bioenergético, ya sea como productores o usuarios, exportadores o importadores. Además de los países del G8 (Canadá, Francia, Alemania, Italia, Japón, Rusia, Reino Unido y Estados Unidos), se incluyeron otros cinco ("países +5"): Sudáfrica, Brasil, China, India y México. Basado en este estudio, la Tabla 37 muestra la contribución de la bioenergía en la oferta total de energía primaria (*total primary energy supply* – TPES), básicamente equivalente a la producción energética nacional, sumando las importaciones y excluyendo las exportaciones. China, con 9.000 PJ por año, es el mayor usuario de bioenergía, seguido por India, con 6.000 PJ, Estados Unidos, con 2.300 PJ, y Brasil, con 2.000 PJ de demanda anual, mientras que en Canadá, Francia y Alemania la contribución de la bioenergía es de cerca de 450 PJ anuales. A lo largo de los últimos años, se verifica que la demanda de biocombustibles tiende a aumentar a un ritmo bastante acelerado, principalmente en Brasil, Alemania, Italia y el Reino Unido, mientras que en Francia, Japón, India y México tiende a mantenerse estable.

**Tabla 37 – Biocombustibles en la oferta total primaria de energía
(En PJ)**

País	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Canadá	409	408	418	437	480	481	451	487	489	510	525
Francia	440	467	438	453	439	430	437	406	420	419	422
Alemania	139	143	195	210	207	229	246	271	312	348	441
Italia	52	51	59	63	69	74	79	76	81	121	123
Japón	191	193	199	183	190	196	180	187	191	190	198
Rusia	259	221	190	157	208	163	158	151	149	143	146
Reino Unido	52	54	57	55	56	61	64	70	82	96	115
Estados Unidos	2.554	2.607	2.531	2.601	2.507	2.551	2.285	2.256	2.474	2.633	2.697
Países del G8	4.097	4.144	4.086	4.160	4.156	4.186	3.900	3.904	4.198	4.460	4.666
Brasil	1.728	1.706	1.719	1.756	1.838	1.794	1.823	1.951	2.110	2.277	2.801
China	8.610	8.656	8.703	8.750	8.906	8.973	9.053	9.127	9.202	9.277	9.360
India	5.862	5.918	5.978	6.039	6.144	6.230	6.313	6.389	6.464	6.539	6.620
México	328	329	338	343	337	333	337	333	336	337	348
Sudáfrica	479	487	495	504	516	529	539	545	551	547	564
Países +5	17.006	17.095	17.233	17.392	17.741	17.859	18.064	18.345	18.662	18.977	19.693
Países G8+5	21.103	21.239	21.319	21.552	21.897	22.045	21.964	22.249	22.860	23.437	24.359

Fuente: GBEP (2007).

Desde el punto de vista de su importancia en relación a las demás fuentes energéticas, la Tabla 38 muestra cómo evolucionó, en los últimos años, la fracción de la demanda total de energía cubierta por biocombustibles del G8+5, la cual puede considerarse representativa de la demanda de otros países de Europa, Asia y Latinoamérica. En la mayoría de los países africanos, así como de los países más pobres de otras regiones, los datos son bastante diferentes ya que la demanda de madera como combustible y otras formas tradicionales de biocombustibles, como residuos, abastece casi de forma absoluta los datos de consumo bioenergético.

La contribución de los biocombustibles a la demanda total de energía alcanza casi el 30% en Brasil e India y sólo un 1% en el Reino Unido y Rusia. En países como Canadá, Francia, Alemania y Estados Unidos, esta contribución varía entre 3% y 4%, alcanzando cerca del 20% en Suecia y Finlandia. La fracción abastecida por la bioenergía en India, China y México está disminuyendo, muy probablemente a causa del aumento en el uso de kerosene y GLP en las residencias. Por otro lado, la contribución de los biocombustibles en los países del G8, especialmente en Alemania, Italia y Reino Unido, aumentó, en los últimos años, de una tasa anual de 4% a 6%.

Tabla 38 – Participación relativa de los biocombustibles en la oferta total primaria de energía
(En %)

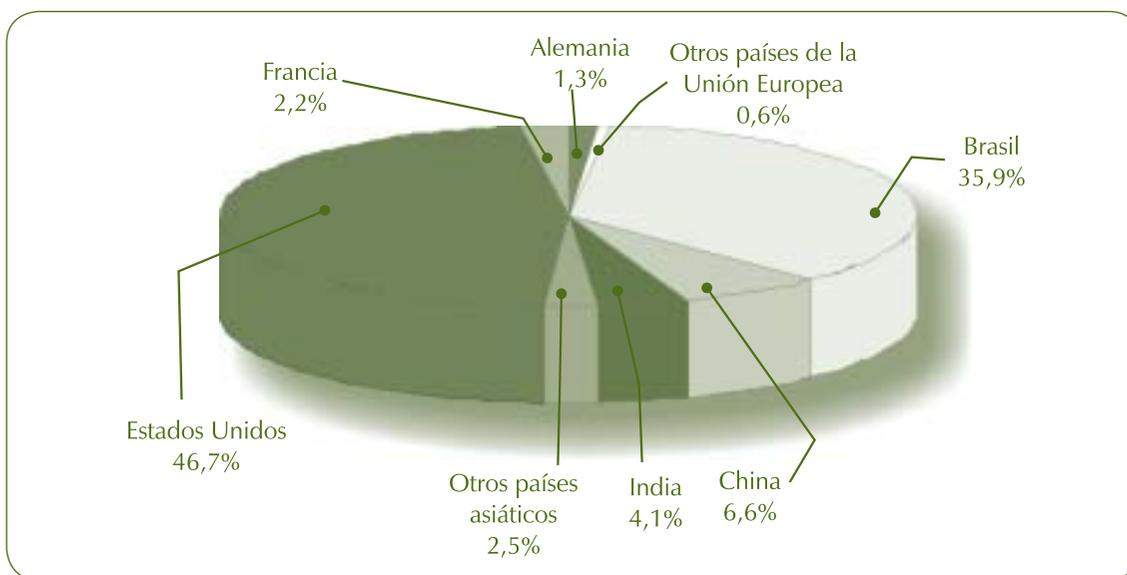
País	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Canadá	4,2	4,1	4,2	4,4	4,6	4,6	4,4	4,7	4,5	4,5	4,6
Francia	4,4	4,4	4,2	4,2	4,1	4,0	3,9	3,6	3,7	3,6	3,6
Alemania	1,0	1,0	1,3	1,4	1,4	1,6	1,7	1,9	2,1	2,4	3,1
Italia	0,8	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	1,1	1,0	1,1	1,6	1,6
Japón	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8	0,9	0,9	0,9	0,9
Rusia	1,0	0,8	0,8	0,6	0,8	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5
Reino Unido	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	1,0	1,2
Estados Unidos	2,9	2,9	2,8	2,8	2,7	2,6	2,4	2,4	2,6	2,7	2,8
Países del G8	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,1	2,0	2,0	2,1	2,2	2,3
Brasil	26,6	25	23,9	23,7	24,1	23,1	23,3	24,3	26	26,5	29,8
China	19,6	19	19,1	19,2	19,4	19,4	19,6	18,2	16,2	14,0	13,0
India	36,1	35,3	34,3	33,9	32,5	32,4	32,3	31,9	31,5	30,0	29,4
México	5,9	5,7	5,7	5,5	5,4	5,3	5,3	5,1	5,0	4,9	4,7
Sudáfrica	10,9	11	11,1	11,1	11,3	11,4	11,8	12,4	11,1	10,2	10,7
Países +5	22,2	21,6	21,4	21,3	21,3	21,2	21,4	20,6	19,2	17,4	16,9

Fuente: GBEP (2007).

Algunos datos sobre la producción de bioetanol revelan importantes tendencias de expansión y diversificación. En el año 2006, la producción total mundial de este biocombustible fue de 51,3 millones de litros y al año siguiente alcanzó los 55,7 mil millones de litros. En 2007, con una producción de 26 mil millones de litros a base de maíz, los Estados Unidos continuaron en el liderazgo de la producción global de bioetanol y Brasil, segundo productor mundial, produjo en ese mismo año cerca de 20 mil millones de litros de bioetanol derivado de la caña de azúcar [REN21 (2008)]. Como líderes de la producción de bioetanol en Asia, China e India produjeron 3,7 mil millones y 2,3 mil millones de litros en 2007, respectivamente. También en 2007, la producción de todos los países asiáticos alcanzó los 7,4 mil millones de litros. En la Unión Europea, la producción de bioetanol aumentó de 1,6 mil millones de litros, en 2006, a cerca de 2,3 mil millones de litros, en 2007. Francia, el mayor productor europeo de bioetanol, produjo en 2007 alrededor de 1,2 mil millones de litros, seguida de Alemania, con 850 millones de litros [F. O. Licht (2007)]. El Gráfico 37 sintetiza la participación de los

principales productores de bioetanol en la oferta total; los países en desarrollo contribuyen con cerca de la mitad de la producción observada.

Gráfico 37 – Distribución de la producción de etanol por regiones, año 2007



Fuente: Elaborado en base a WWI (2007) y F. O. Licht (2007).

Es notable lo aceleradamente que ha evolucionado la situación, con elevadas tasas de crecimiento por año. De hecho, los valores de la producción de bioetanol presentados en esta sección representan una pequeña fracción del potencial de producción existente. Este potencial deberá aumentar en los próximos años, como se analiza en el siguiente apartado.

8.3 Proyecciones de oferta y demanda de bioetanol para 2010–2015

Esta sección analiza la oferta y la demanda de bioetanol para el inicio de la próxima década, cuando se espera que el mercado de ese biocombustible comience, efectivamente, a desarrollarse. Se analiza, de forma separada, la situación de Norteamérica (excluyendo México, tratado en el ámbito de Latinoamérica), de la Unión Europea, de Latinoamérica y el Caribe, y de Asia y Oceanía, considerando especialmente los países que ya implementaron o que posiblemente implementarán políticas de incentivos a la producción y al consumo de biocombustibles. En su mayor parte, los valores se extrajeron de estudios desarrollados por el Global Biofuels Center, institución dedicada a estudios estratégicos en los mercados de biocombustibles. En el caso de Brasil, se presentarán proyecciones en la sección dedicada a Latinoamérica basadas en la evolución prevista para el mercado de combustibles y en la capacidad instalada en unidades de procesamiento de caña de azúcar. Para el continente

africano, donde se observan algunas iniciativas de fomento al uso de biocombustibles, se realizaron algunas proyecciones de mercado más detalladas. Al final se muestra un cuadro general con la situación de cada mercado en el horizonte previsto.

Norteamérica, excluyendo México

Tanto Canadá como los Estados Unidos están desarrollando normas nacionales para combustibles renovables que volverán obligatorio el agregado de un porcentaje de biocombustibles a la gasolina y al diésel. En los Estados Unidos, la actual referencia para las políticas públicas federales de biocombustibles es el Programa de Normas para Combustibles Renovables (Renewable Fuels Standard – RFS). La Ley de Políticas Energéticas, emitida en el año 2005, estableció las directrices de este programa que fue desarrollado y reglamentado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (Environmental Protection Agency – EPA) y entró en vigor el 1º de septiembre de 2007. Este programa determinaba que un cierto porcentaje de gasolina vendida o usada por conductores debía ser de combustibles renovables, determinación cumplida sin dificultades, pues los Estados Unidos ya consumían, en 2007, más combustibles renovables de lo exigido por la RFS [White House (2008)].

Sin embargo, a partir de finales del 2007, con la promulgación de la Ley de Seguridad e Independencia Energética (Energy Independence and Safety Act – EISA), se revisaron las metas del RFS, aumentando progresivamente la cantidad exigida de biocombustible, hasta un monto de 136 mil millones de litros de bioetanol y otros biocombustibles en el año 2022 [USDA (2008)]. Esta legislación define nuevas categorías de combustibles renovables, estableciendo niveles mínimos de consumo que van creciendo a lo largo del tiempo en el caso de las categorías de menor impacto ambiental. Esas categorías son:

Biocombustible conversión: definido como bioetanol derivado del almidón de maíz. Las nuevas unidades de producción de etanol que comenzaron a ser construidas después de la reglamentación de esa ley, deben alcanzar una reducción de emisiones de gases de efecto invernadero del 20% en su ciclo de vida, comparadas con las emisiones de referencia. El índice obligatorio de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero durante el ciclo de vida puede reducirse al 10% si la EPA determina que la exigencia es impracticable.

Biocombustible avanzado: Combustible renovable, no es bioetanol de almidón de maíz, deriva de biomasa renovable y alcanza, durante el ciclo de vida, una reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero del orden del 50% por debajo del valor de referencia. Esta definición, de acuerdo con la legislación estadounidense, incluye biocombustibles diversos como bioetanol de celulosa, bioetanol de azúcar o de almidón, que no sea de maíz; o biocombustibles producidos con desechos animales, alimentarios, agrícolas o domésticos, diésel de biomasa, biogás (incluyendo gases de rellenos sanitarios y alcantarillado), butanol y otros alcoholes producidos con biomasa y otros combustibles derivados de biomasa celulósica.

Biocombustible celulósico: combustible renovable producido a base de cualquier celulosa, hemicelulosa o lignina, derivada de biomasa renovable, y que alcanza, durante el ciclo de vida, una reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero de un orden del 60% por debajo del valor de referencia.

Las nuevas disposiciones, de acuerdo con lo determinado por el EISA, establecen que los combustibles renovables deben cumplir con los límites mínimos de reducción de emisión de gases de efecto invernadero durante su ciclo de vida, incluyendo las emisiones durante todas las etapas de producción de materia prima y del combustible y durante su distribución, contabilizando emisiones directas e indirectas, e incluyendo las emisiones que resultan de los cambios en el uso de la tierra. De acuerdo con las proyecciones del Global Biofuels Center, se cree que las nuevas metas establecidas en la legislación estadounidense serán alcanzadas, probablemente, con una producción interna de bioetanol de 70 millones de metros cúbicos proyectada para el año 2015 [Global Biofuels Center (2008)].

De forma semejante, el gobierno de Canadá deberá hacer obligatorio el agregado del 5% de combustible renovable en el volumen de la gasolina, a partir del año 2010. Se está desarrollando la reglamentación para implementar las normas correspondientes. De acuerdo con esta propuesta el cumplimiento de la mezcla obligatoria generará una demanda de 2,2 mil millones de litros de bioetanol en 2010; por otro lado, se espera que la oferta sea de 2,9 mil millones de litros, con expectativas de que nuevas instalaciones de producción de etanol se inauguren y comiencen a operar en el año 2015. De hecho, suponiendo que en ese año se implante una mezcla con 10% de bioetanol, serán necesarios más de 4,7 mil millones de litros, superando bastante la capacidad de producción actualmente existente.

Unión Europea

Algunos países que integran la Unión Europea comenzaron a interesarse por biocombustibles ya en los noventa, pero no fue sino a fines del año 2001 cuando surgieron acciones más coordinadas a nivel comunitario. Al mismo tiempo, la agroindustria bioenergética pasó a crecer, apoyada por la adopción de políticas favorables e incentivos fiscales en diferentes países. Los dos países donde los biocombustibles alcanzaron la mayor penetración en el mercado de combustibles automotrices fueron Alemania y Suecia, especialmente en biodiésel. Países como Francia, con grandes áreas de tierras arables y políticas proteccionistas en relación a sus agroindustrias, también implementaron herramientas específicas para promover el uso de biocombustibles. Es interesante constatar que en el año 2006 las inversiones europeas en bioetanol, asociadas al cumplimiento de las metas establecidas para 2010, superaron por primera vez las inversiones en biodiésel.

Otros estados miembros, como España, fomentaron la producción de biocombustibles sin tener grandes mercados domésticos, con la intención de exportar los excedentes de su producción. Los Países Bajos y el Reino Unido adoptaron posturas más conservadoras y consideran los biocombustibles de segunda generación una alternativa más sostenible que los de primera generación. No

obstante, ambos países establecieron sistemas de obligatoriedad para el uso de biocombustibles. El caso de la República Checa, que pasó a ser estado miembro en el año 2004, nos interesa mucho por el rápido desarrollo de biocombustibles que ha mantenido desde 2006, cuando el precio del petróleo alcanzó niveles elevados.

Con el objetivo de crear mercados de biocombustibles más fuertes, la Comisión Europea propuso una meta mínima obligatoria del 10% de la energía producida a base de biocombustibles hasta el 2020. Los mecanismos para lograr esos objetivos son directivas, que le establecen a los estados miembros los resultados a alcanzar, mientras que se deja en manos de las instancias nacionales lo relacionado con la forma y los medios para lograr los resultados propuestos [Soares (1997)]. Las dos principales directivas sobre el uso de biocombustibles en la Unión Europea son la Directiva para Biocombustibles (Biofuels Directive), lanzada en 2003, que establece las metas del uso de biocombustibles; y la Directiva para la Calidad de los Combustibles (Fuel Quality Directive), revisada en el año 2007, que considera la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero e incluye los biocombustibles en las especificaciones de calidad de los combustibles europeos.

Las metas establecidas por la Directiva para Biocombustibles son indicativas (no obligatorias), establecidas como porcentajes en energía sobre el uso de combustibles fósiles, en el sector de transporte. Para el año 2005 la meta fue de 2% y para el 2010 es de 5,75%, ambas referidas al contenido energético. En enero de 2008, la Comisión Europea publicó su propuesta de Directiva para Energía Renovable, que deberá prevalecer sobre la Directiva para Biocombustibles, a partir de 2010. Esta propuesta incluye la obligatoriedad del uso del 10% de biocombustible por contenido energético en el 2020, meta que deberá ser alcanzada con el uso de biocombustibles sostenibles, definidos en relación a parámetros establecidos en la propia directiva, y con el uso de biocombustibles de segunda generación, que serán contabilizados al doble en el cumplimiento de la meta propuesta para el año 2020. La Directiva para Energía Renovable propuesta se está discutiendo en el Parlamento Europeo y en el Consejo de Ministros, con expectativas de que se apruebe en junio de 2009.

De acuerdo con la Asociación Europea de Productores de Bioetanol (eBIO), en el año 2007 la producción de etanol aumentó un 13,5%, incremento modesto si se lo compara con el 70% observado en 2006 y 2005. Esta asociación informa, además, que las importaciones de etanol alcanzaron en 2007 una cifra récord de casi mil millones de litros. La Tabla 39 muestra la evolución de los indicadores de la agroindustria y del mercado de bioetanol en la Unión Europea de 2005 a 2007.

En base a las hipótesis adoptadas para el escenario moderado del proyecto Refuel (desarrollado con el patrocinio de la Unión Europea, en un esfuerzo conjunto de diferentes instituciones para fomentar el uso de biocombustibles), el bioetanol deberá alcanzar la meta del 5% del contenido energético en 2010, el 7,5% en 2015 y 10% en 2020 [Refuel (2008)]. Sin embargo, el aumento previsto para la producción, estimado en función de las unidades productoras de bioetanol existentes y anunciadas, indica que será necesaria la importación de

etanol, suponiendo que todas las fábricas trabajen con 70% de capacidad en 2010 y 80% de capacidad en 2015 y 2020 [Global Biofuels Center (2008)].

Tabla 39 – Capacidad, producción y consumo de bioetanol en la Unión Europea (En millones de litros/año)

Año	2005	2006	2007
Capacidad instalada	–	2.876	3.344
Producción	913	1.593	1.770
Consumo	1.150	1.700	2.700
Importación	237	107	930

Fuente: Global Biofuels Center (2008).

En función de la meta del 10% de etanol para 2020, serán necesarios 17,7 mil millones de litros de etanol. La capacidad de producción local podrá alcanzar los 12,16 mil millones en 2015 y, luego, permanecerá estable, suponiendo que no se inicia ningún nuevo proyecto de producción de bioetanol convencional y bajo la expectativa de que el etanol celulósico comience a entrar en el mercado [Global Biofuels Center (2008)]. En resumen, con metas obligatorias y varios países implementando metas individuales de consumo para el etanol y el biodiésel, el crecimiento de la demanda podrá ser significativo en la Unión Europea, superior a la disponibilidad interna, y las importaciones deberán compensar la diferencia entre oferta y demanda en esa región.

Latinoamérica y el Caribe, incluyendo Brasil

La producción y el uso de biocombustibles tiene gran potencial tanto en Latinoamérica como en el Caribe. La mayoría de los países dependen, en gran medida, de la importación de productos de petróleo; además, enfrentan una demanda creciente de combustible de transporte y poseen gran disponibilidad de materia prima adecuada para producir etanol y biodiésel. Estos países comparten el interés de ampliar su seguridad energética y promover el desarrollo económico y social asociado a los biocombustibles, como se observara en Brasil, y consideran el desarrollo de programas de biocombustibles un camino para alcanzar ambos objetivos. Con este propósito, muchos países de Latinoamérica están, actualmente, intentando introducir mezclas de bioetanol, en general de 5% a 10% de volumen en la gasolina y, en el caso del biodiésel, de 2% a 5% en el volumen del diésel. Entre las varias iniciativas desarrolladas, se pueden destacar por sus avances, los casos de Colombia y Costa Rica [Horta Nogueira (2007)].

Desde 2001, por medio de la promulgación de la Ley 693, se dio inicio a la implantación de la producción y el uso del etanol en Colombia. La exposición de los motivos de esta ley presenta como sus objetivos principales la reducción de las emisiones de hidrocarburos y del

monóxido de carbono, el mantenimiento y la generación de empleos agrícolas, el desarrollo agroindustrial y la contribución al propósito estratégico de autosuficiencia energética. En resumen, esta ley establece ya en su primer artículo que “las gasolinas utilizadas en los centros urbanos de más de 500 mil habitantes, en un plazo final de septiembre de 2006, deberán contener compuestos tales como alcohol carburante”. En esa misma ley se define como gasolina oxigenada aquella con contenido del 10% de biocombustibles [UPME (2006)]. Este programa fue precedido de un cuidadoso planeamiento e información a los involucrados y está en pleno desarrollo.

La primera planta colombiana de bioetanol combustible comenzó a operar en 2005, con una producción de 300 mil litros por día. En 2006, otras cinco plantas pasaron también a producir este biocombustible, todas ellas en el Valle del río Cauca, con una capacidad combinada de 357 millones de litros por año. En esta región el cultivo de la caña de azúcar se desarrolla muy bien, con cosecha todo el año, lo que otorga a las destilerías una elevada disponibilidad. El gobierno colombiano espera que el país alcance para el 2010 una capacidad anual de producción de 1,7 millones de litros de bioetanol, volumen necesario para agregar un 10% de etanol a la gasolina y obtener excedentes exportables del orden del 50% del total producido [Horta Nogueira (2007)].

En Costa Rica, las primeras experiencias con el bioetanol carburante se desarrollaron durante la década de los ochenta, pero se discontinuaron en 1985 debido a los bajos precios del petróleo. Sin embargo, con el escenario reciente más favorable a los biocombustibles, el gobierno de este país articuló un nuevo programa para implantar el uso del bioetanol. En mayo de 2003, el Poder Ejecutivo costarricense emitió el Decreto 31.087-MAG-MINAE, creando una Comisión Técnica para “formular, identificar y para proyectar estrategias para el desarrollo del etanol anhidro destilado nacionalmente y usar materias primas locales, como sustituto del MTBE en la gasolina”. Los objetivos básicos presentados en este decreto eran: El desarrollo agroindustrial (reactivación económica, generación de valor agregado), mejora ambiental (por ejemplo, mediante la sustitución del MTBE) y, desde el punto de vista energético, la diversificación de las fuentes y la reducción de la dependencia externa del combustible fósil. El programa apunta a incorporar inicialmente un 7,5% de etanol en la gasolina usada en el país, desarrollándose en etapas sucesivas, para la asimilación de los procedimientos operacionales y la expansión gradual de la infraestructura. En forma preliminar se condujeron ensayos en diferentes vehículos con la mezcla de combustible, con buenos resultados, y sucesivamente se pasó a la comercialización en mercados limitados. Considerando la incorporación de un 10% de bioetanol en toda la gasolina usada en el país, la demanda costarricense de este biocombustible se estima en 110 millones de litros anuales en 2010. La empresa estatal de petróleo, Recope, ha desempeñado un papel fundamental para la adecuada introducción del bioetanol en Costa Rica [Horta Nogueira (2007)].

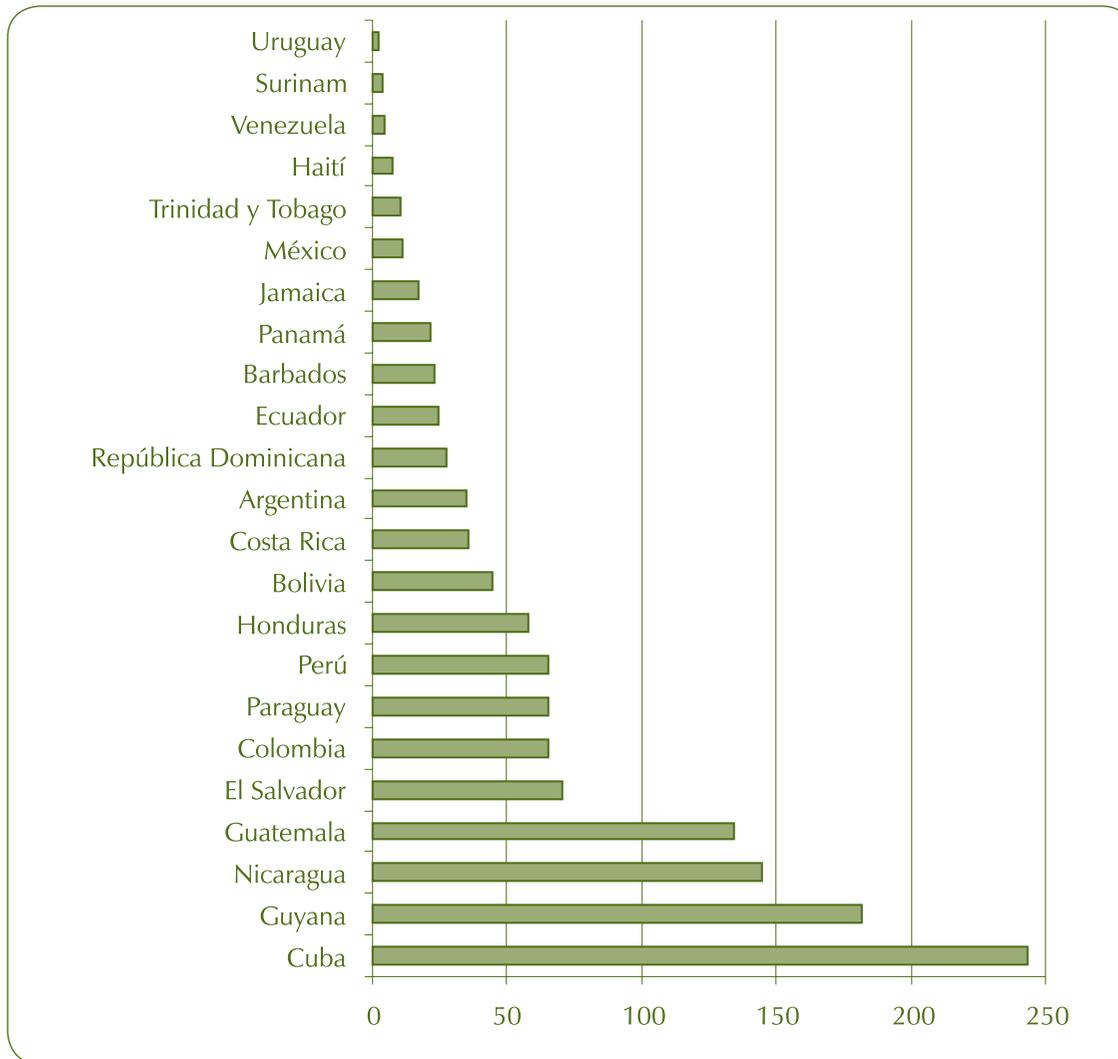
Para evidenciar el potencial de los países latinoamericanos y para fomentar una mezcla del 10% de bioetanol de caña de azúcar en la gasolina consumida internamente, en especial en lo que concierne a la disponibilidad de tierras y a la dimensión de la industria azucarera

local, se exploraron dos contextos [Cepal (2007)]: a) producción de bioetanol por medio de la conversión de la melaza, asumiendo una productividad de 78 litros de bioetanol por tonelada de azúcar producido; y b) la producción exclusiva de bioetanol, considerando conservadoramente una productividad agrícola de 75 toneladas por hectárea y una productividad industrial de 80 litros de bioetanol por tonelada de caña, correspondiendo a 6 mil litros de bioetanol por hectárea. Para el primer caso, se determina que la fracción de la demanda de bioetanol podría ser abastecida con la melaza que se obtiene como subproducto de la fabricación de azúcar, y para el segundo caso, se determinó el área de caña requerida, como porcentaje del área agrícola total y del área cultivada con caña de azúcar, informadas en base a Faostat (2008a). Los datos de la demanda de gasolina, y por lo tanto la demanda de bioetanol, se refieren a valores para del año 2004 [Olade (2006)]. Los resultados se presentan en los Gráficos 38 y 39, en los cuales se incluyeron solamente los países con más de mil hectáreas cultivadas con caña de azúcar. Brasil fue excluido de ese análisis, pues ya tiene un amplio programa de producción y uso de bioetanol, incluyendo bioetanol puro.

Como se observa en los Gráficos 38 y 39, el bioetanol de caña de azúcar se puede producir en el ámbito de las necesidades nacionales, sin impactos significativos. En promedio, para la región latinoamericana, con la meta de una mezcla de 10% de bioetanol en la gasolina, la exigencia de biocombustible podría cumplirse en un 35%, mediante el uso de las melazas existentes o, alternativamente, aumentando en un 22% la actual superficie cultivada de caña, lo que significa cerca de un 0,4% de la superficie agrícola en la producción, pero con mucha diversidad entre los países. De esta manera, Cuba, Guatemala, Guyana y Nicaragua presentan elevada disponibilidad potencial de producción del bioetanol, a base de melaza, superior a la necesidad correspondiente a una mezcla de 10% en la gasolina. En el otro extremo, en Haití, Surinam, Uruguay y Venezuela, la dimensión de la agroindustria de la caña no alcanza ni al 10% de las necesidades de etanol, según el esquema considerado. Desde el punto de vista de las disponibilidades de la tierra, la meta del 10% de mezcla puede alcanzarse en la mayoría de países de la región latinoamericana, sin necesidad de expandir significativamente el área cultivada. Con excepción de Barbados, Jamaica, Trinidad y Tobago, Surinam y Venezuela, con menos del 1% de la superficie agrícola de los países sería posible producir etanol suficiente para la mezcla del 10%.

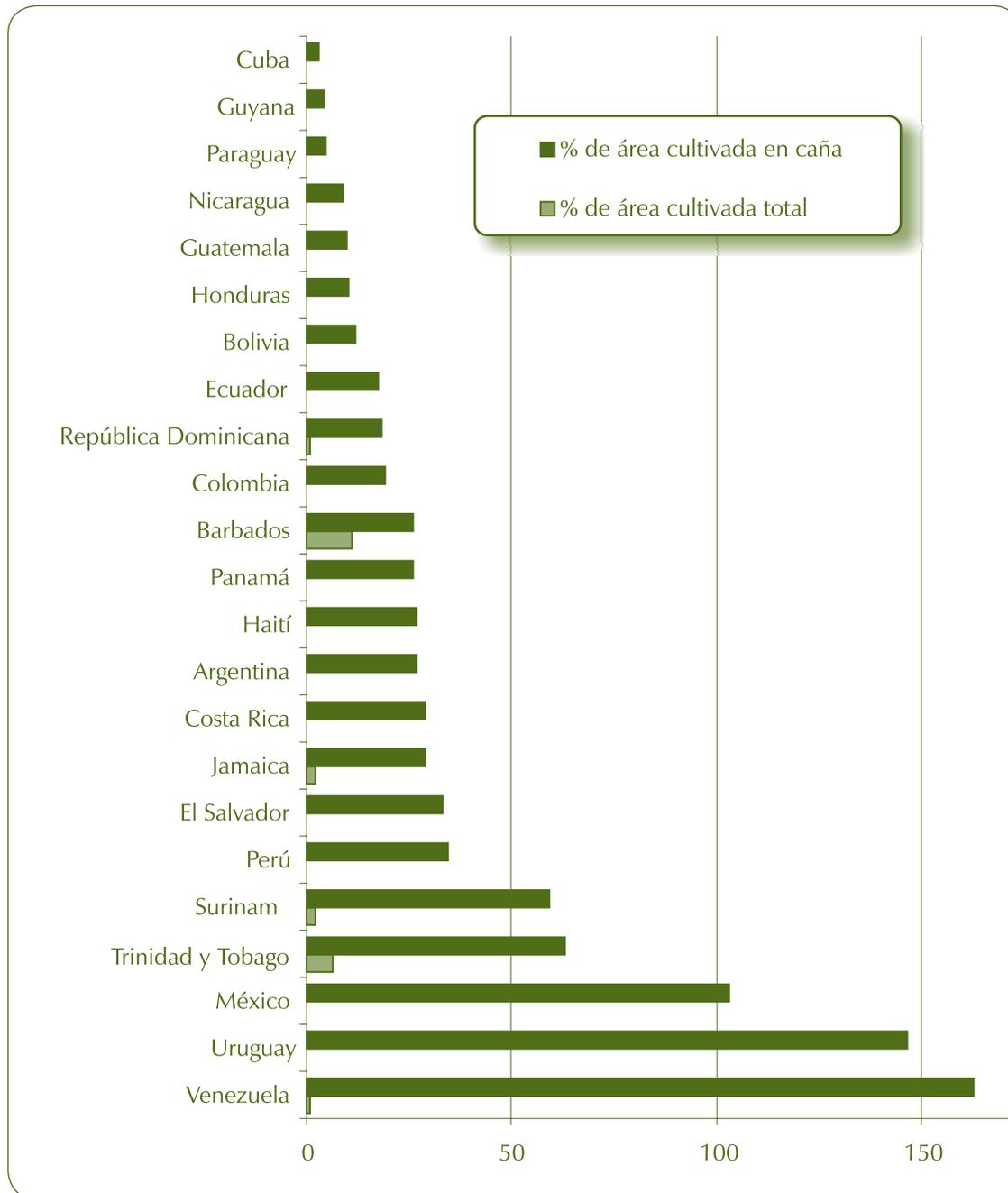
Otro factor importante que estimula la producción de bioetanol en los países de Latinoamérica y el Caribe es la reestructuración del régimen azucarero por la Unión Europea en el ámbito de la Política Agrícola Común, que reducirá las garantías de precio para estos países en un 36% en cuatro años. Como respuesta, países como Barbados, Belice, Jamaica y Guyana están considerando orientar sus disponibilidades de azúcar para la producción de etanol. A este respecto, Jamaica es el país más adelantado, pues pretende implementar en 2008 la mezcla obligatoria de 10% de bioetanol en la gasolina.

Gráfico 38 – Fracción de la demanda de bioetanol para agregar el 10% a la gasolina que se puede producir mediante la conversión de melaza disponible en la fabricación de azúcar



Fuente: Cepal (2007).

Gráfico 39 – Fracciones de las áreas de cultivo (total y en caña) necesarias para producir el bioetanol requerido para agregar un 10% a la gasolina, asumiendo la conversión de jugo directo



Fuente: Cepal (2007).

Además de abastecer sus mercados internos, muchas veces con dimensiones limitadas, los países latinoamericanos evalúan la posibilidad de exportar bioetanol, especialmente a los Estados Unidos. Los principales acuerdos que apoyan esas iniciativas son el Tratado de Libre Comercio entre República Dominicana, Centroamérica y Estados Unidos (Dominican Republic - Central American Free Trade Agreement, DR-CAFTA), ratificado por el Congreso estadounidense en 2005, y la Iniciativa de la Cuenca del Caribe (ICC, CBI por su siglas en Inglés), establecida por ese Congreso en 1983. Esta última iniciativa exonera, dentro de condiciones determinadas, los productos importados de los países beneficiarios (Antigua y Barbuda, Aruba, Bahamas, Barbados, Belice, Islas Vírgenes Británicas, Costa Rica, Dominica, República Dominicana, El Salvador, Granada, Guatemala, Guyana, Haití, Honduras, Jamaica, Montserrat, Antillas Holandesas, Nicaragua, Panamá, San Cristóbal y Nieves, Santa Lucía, San Vicente y Granadinas, y Trinidad y Tobago).

En el contexto de la ICC, en la mayoría de los casos el etanol hidratado se embarca en Brasil rumbo a los países habilitados, donde se deshidrata y se exporta a los Estados Unidos. Los principales exportadores en este esquema son Jamaica, Costa Rica, El Salvador y, más recientemente, Trinidad y Tobago. Según las reglas de la ICC, se puede exportar bioetanol en los siguientes casos: a) volúmenes hasta el 7% del mercado de Estados Unidos sin restricciones de origen, o sea, se acepta biocombustible procesado en el país, b) 132 millones de litros de bioetanol como cuota suplementaria, que contenga por lo menos un 35% de producto local; y c) un volumen ilimitado de biocombustible siempre que contenga más del 50% de contenido local. Las importaciones de bioetanol en el mercado estadounidense se situaron en los 4,6 mil millones de litros en 2006 y 2007, en su mayor parte (cerca del 75%) realizadas a través del ICC y, en menor grado, oriundas directamente de Brasil, Canadá y otros países [Global Biofuels Center (2008)].

Para América Latina y el Caribe excluyendo Brasil, se elaboró una proyección de oferta y demanda de bioetanol, que será presentada más adelante junto con los valores para las demás regiones. Se tomaron en cuenta los siguientes países, que están implementando o implementarán programas de biocombustibles para el 2010: Argentina, Colombia, Costa Rica, República Dominicana, Ecuador, Jamaica, México, Paraguay, Perú, Trinidad y Tobago, Uruguay y Venezuela. Se consideró que la oferta hasta el 2010 incluiría la producción de unidades actualmente en operación y en construcción y proyectadas para entrar en operación hasta ese año. Se supone también que en el 2015, la mayor parte de las unidades actualmente propuestas estará construida. La capacidad nominal se utilizó para estimar el potencial de oferta; la demanda se calculó en función de la demanda prevista de gasolina y de la implementación de las metas [Global Biofuels Center (2008)].

El análisis efectuado mostró que varios países deberán aumentar su capacidad para cumplir continuarán las metas previstas en los próximos años. Varios países estarán o continuarán estando en posición de exportadores de bioetanol durante esos años: Costa Rica, Jamaica, Paraguay, Perú, Trinidad y Tobago e incluso Uruguay. Las exportaciones de todos los países, excepto Perú, continuarán yendo a los Estados Unidos, en el marco de programas aplicables en los términos de los acuerdos antes mencionados. En el caso del Perú, podrá exportar sus

productos al mercado estadounidense bajo los auspicios del Tratado de Libre Comercio Perú – Estados Unidos, ratificado por el Congreso del país norteamericano en diciembre 2007 [Global Biofuels Center (2008)].

Las perspectivas del mercado del bioetanol en el caso brasileño son, evidentemente, diferentes de los demás países de la región latinoamericana, debido a la madurez de su programa de biocombustibles y a la gran expansión observada en el consumo y en la capacidad de producción de bioetanol, como se detalló en el capítulo anterior. También, debido a la intensa dinámica observada en esa agroindustria, no es una tarea simple estimar escenarios futuros, ya que nuevos proyectos son lanzados frecuentemente, enfocados inicialmente al creciente consumo interno de bioetanol. No obstante, para establecer un nivel de producción y consumo en los horizontes de interés, se realizaron algunas estimaciones conservadoras. Se tomó como base la producción estimada de bioetanol para 2008, de cerca de 26,1 mil millones de litros, y se consideró una tasa de crecimiento anual del 8%, coherente con la evolución verificada en los últimos períodos de cosecha. Además, se consideró el número de proyectos que se están implantando, con 35 nuevas plantas comenzando a operar en la cosecha 2008/2009 y otras 43 unidades que deben entrar en operación en el período siguiente [Nastari (2008)]. Como resultado se estima una producción de bioetanol de 30,5 mil millones de litros en 2010. En los años siguientes el mercado externo presentaría mayor importancia y la capacidad de producción de bioetanol debería alcanzar, en el 2015, cerca de 47 mil millones de litros, equivalente a una tasa de crecimiento anual del 9% [BNDES (2008)].

Con relación a la demanda de bioetanol en el mercado brasileño, algunas estimaciones presentadas hace pocos años fueron ampliamente superadas, principalmente a causa de la expansión del mercado de vehículos *flex-fuel*. De hecho, esta nueva tecnología vehicular introduce más incertidumbres en las proyecciones de demanda, pues ofrece la posibilidad de que los usuarios elijan utilizar bioetanol puro o gasolina con bioetanol en diferentes proporciones. Por otro lado, el gobierno puede alterar la concentración de mezcla de etanol entre el 20% y el 25%, afectando directamente la demanda efectiva de bioetanol anhidro. Estos factores, unidos al escenario incierto de los precios, amplían el margen de error de la proyección de consumo. Una evaluación de la evolución de la flota de vehículos livianos en Brasil y de los datos históricos de consumo de combustibles, indica que hacia el año 2015 la demanda interna de bioetanol podría estar entre 28 y 34,3 mil millones de litros, asumiendo que el 50% y el 75% del consumo de los vehículos *flex-fuel*, respectivamente, serán abastecidos por el bioetanol hidratado [BNDES (2008)]. En ese mismo estudio se presentan diversas proyecciones del mercado brasileño del bioetanol, con razonable dispersión entre las estimaciones. De un modo conservador, análogamente a la proyección de la oferta, se asumió que la mayor parte de la producción de bioetanol deberá abastecer el mercado nacional, con una exportación de 5 mil millones de litros en 2010, valor aproximado de las exportaciones observadas en 2008, y 10 mil millones de litros en 2015, cuando el mercado internacional de bioetanol debería estar mejor estructurado. Obsérvese que la demanda doméstica de bioetanol corresponde a los usos vehiculares y a las aplicaciones industriales, segmento que viene creciendo de modo importante en Brasil.

África

La menor dimensión relativa del mercado africano de combustibles y la limitada base de informaciones sobre proyectos de biocombustibles en los diversos países no significan que esa región sea de mejor interés en las evaluaciones prospectivas para el bioetanol. En realidad, este continente, particularmente en su fracción sur, presenta regiones con evidente y relevante potencial bioenergético, cuya utilización podrá articularse con otros propósitos de desarrollo social y económico.

De hecho, desde la década de los ochenta existe la disposición de promover el uso de bioetanol en África. Dos iniciativas pioneras pueden mencionarse. En Malawi, desde 1982 opera la empresa Ethanol Company of Malawi (ETHCO), que fabrica etanol a base de melaza de caña de azúcar para fines combustibles. Y en Zimbabwe, el programa de bioetanol combustible, lanzado en 1980 pero discontinuado luego de una grave sequía a comienzos de la década pasada, pero que podría entrar nuevamente en operación [Gnansounou et al. (2007)]. Más recientemente, en Nigeria, a partir del 2006, se realizaron ensayos con bioetanol en la gasolina, y en Sudáfrica, empresarios manifestaron su interés en la implementación de unidades productoras de bioetanol, en especial después de que el gobierno se mostrara favorable a la posibilidad de introducir el uso obligatorio de este biocombustible mezclado en la gasolina [Alexander (2005)]. En Ghana, se implementa una unidad productora con capacidad de 150 millones de litros anuales de bioetanol de caña de azúcar, en un modelo que podrá ser replicado en Tanzania y en Mozambique [F.O.Licht (2008b)]. En la actualidad, existen por lo menos 11 países en el continente creando reglas para la producción y comercialización de bioetanol, entre ellos Sudáfrica, Angola, Mozambique y Benin. La mayoría pretende adoptar la mezcla del 10% de bioetanol en la gasolina [Exame (2007)].

La producción de bioetanol de caña de azúcar observada en 2006 fue de 439 millones de litros, siendo Sudáfrica responsable por el 89% de esa producción. Considerados de forma agregada y preliminar, teniendo en cuenta informaciones del potencial de consumo interno de gasolina y las perspectivas de exportación asociadas a las buenas condiciones de productividad, los escenarios conservadores de demanda en el continente africano serían de 1 y 1,5 mil millones de litros en 2010 y 2015, respectivamente. A su vez, la producción en el año 2010 estaría al mismo nivel que la demanda, pudiendo considerarse una exportación de 500 millones de litros en 2015.

África tiende a ser, en el mediano plazo, una región importante y en expansión dentro del escenario bioenergético. En un trabajo conjunto del Ministerio de Relaciones Exteriores y del Ministerio de Agricultura, el gobierno brasileño ha incentivado la siembra de caña de azúcar y la instalación de destilerías en países como Botswana, Congo, Gabón y Tanzania. Considerando las disponibilidades de suelo y las características de clima, se cree que los países de la región sur del continente, con mayores posibilidades de desarrollar programas de producción bioenergética, son Sudáfrica, Zambia, Angola, Mozambique, Zimbabwe, Malawi y Madagascar, básicamente mediante la diversificación de la agroindustria de la caña de azúcar ya existente [Gnansounou et al. (2007)].

Asia y Oceanía

La región de Asia y Oceanía ha estado activa en la implementación de programas de biocombustibles y en la utilización de recursos agrícolas para producir biocombustibles, orientados a satisfacer una demanda doméstica creciente, además de eventuales mercados externos. Aún así, algunos países asiáticos no han sido capaces de alcanzar metas ambiciosas a tiempo o han mostrado cautela en la comercialización de biocombustibles, debido a la indefinición en temas como precio, oferta a largo plazo, logística e infraestructura, además de aspectos asociados a la desconfianza de la compatibilidad de los vehículos con biocombustibles.

Las motivaciones para la promoción de biocombustibles han sido diferentes entre los países asiáticos y Oceanía. Los países desarrollados de la región, como Australia, Japón, Nueva Zelanda y Corea del Sur, han buscado en los combustibles renovables una forma de alcanzar las metas del Protocolo de Kyoto para la reducción de las emisiones de CO₂ para el 2012, independientemente del hecho de que estas metas sean obligatorias o voluntarias. De esta manera, programas de biocombustibles fueron introducidos en estos países, principalmente por medio del establecimiento de metas de producción o ventas. Sin embargo, Japón, Corea del Sur y Taiwán no poseen tierras suficientes para desarrollar cultivos energéticos, debido a su alta densidad poblacional, lo que restringe la producción de biocombustibles a aquellos que se pueden obtener de aceites reciclados y desechos.

La oferta de materia prima a largo plazo es una cuestión primordial para estos países. Como ejemplo de las posibles líneas de conducta, Japón presentó un plan para el desarrollo gradual de un programa de biocombustibles, estableciendo como meta agregar bioetanol a la gasolina utilizada en volúmenes correspondientes al 0,6% del consumo vehicular de energía fósil en el país para el año 2010, lo que significaría un volumen anual de 500 millones de litros de este biocombustible. Aunque es un programa modesto, indica una disposición favorable. La iniciativa comenzó en el año 2007, con la introducción del 7% en volumen de ETBE en parte de la gasolina comercializada en el área de Tokio. Para el año 2030 se considera la adopción de un 10% de biocombustibles en la demanda energética en transportes.

El gobierno japonés, con el apoyo de la industria automovilística local, también ha realizado ensayos con un 3% de bioetanol en las ciudades de Osaka y Miyakojima, esta última en la isla de Okinawa, donde se cultiva caña de azúcar [Global Biofuels Center (2008)]. Recientemente, Petrobras y la empresa japonesa de comercio exterior Mitsui formalizaron la constitución de una empresa en Brasil para inversiones en proyectos de bioenergía, con la finalidad principal de producir etanol para el mercado japonés.

A su vez, países en desarrollo como China, India, Indonesia, Filipinas y Tailandia analizan la posibilidad de producir biocombustibles a partir de excedentes de producción agrícola, sobre todo para reducir su dependencia de combustibles convencionales y, al mismo tiempo, disminuir las emisiones de impacto local y proporcionar estabilidad a los agricultores. Indonesia y las Filipinas están adelantados, observando en los biocombustibles una solución para

incentivar la actividad económica y reducir su deuda externa. En estos países se han implementado programas de promoción de biocombustibles, sea por medio del establecimiento de metas o de medidas que hagan obligatorias las mezclas de biocombustibles en ciertos porcentajes.

En el caso de China, la meta informada es agregar un 10% de etanol a la gasolina en cinco provincias, lo que corresponderá a una demanda anual de 1,6 mil millones de litros, la cual aumentaría paulatinamente con la entrada de otras provincias en el programa. Además, India y Tailandia, con metas de agregar un 10% de bioetanol y un consumo inicial estimado, respectivamente, en 400 millones y 300 millones de litros por año, han enfrentado obstáculos logísticos en la implementación del programa y se comportan de forma cautelosa en sus programas para el biodiésel [Global Biofuels Center (2008)].

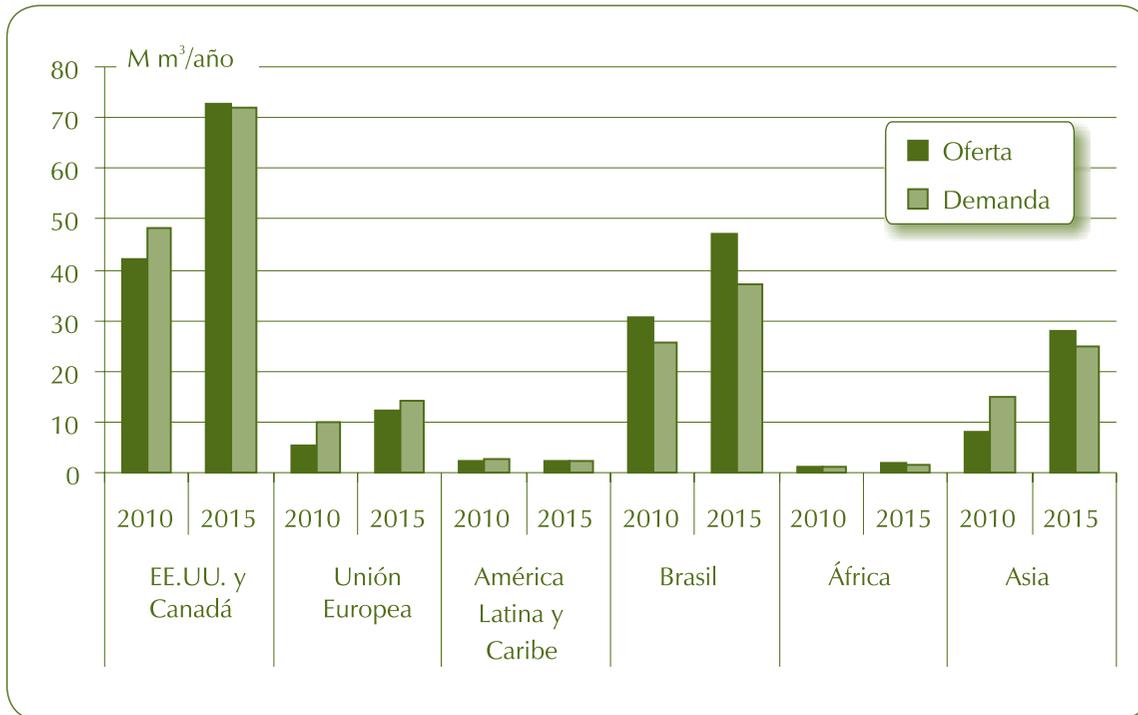
En la región asiática y en Oceanía los derivados del petróleo son fuertemente subsidiados, lo cual estimula el empleo de los biocombustibles como una alternativa para la sustitución de combustibles convencionales. En general, la mayor parte de los países está encaminando la introducción del uso de bioetanol en concentraciones de 5% a 10%, incluyendo Australia, China, India, Indonesia, Japón, Nueva Zelanda, Filipinas y Tailandia. Existe, actualmente, una razonable producción de bioetanol en Australia, China e India, pero estos países deberán aumentarla para alcanzar sus metas.

En el estudio prospectivo de oferta y demanda para la región, presentado a continuación, se incluyeron los siguientes países: Australia, China, India, Indonesia, Japón, Nueva Zelanda, Filipinas y Tailandia, asumiendo que todos alcanzarán las metas establecidas para la introducción del bioetanol en 2010 y 2015. Como resultado general para la región, se espera un faltante de bioetanol en 2010, que deberá ser superado en el 2015. Australia, India y China deberán implementar nuevas unidades de producción para alcanzar sus metas, cuyo cumplimiento dependerá de importaciones en 2010, pero que podrán ser superadas por la producción local en 2015. Japón dependerá exclusivamente de importaciones. Los grandes importadores de la región serán Japón y China, y potencialmente, Australia y Nueva Zelanda. Se estima que, como máximo en el año 2015, India, Indonesia y Tailandia estarán en condiciones de exportar [Global Biofuels Center (2008)].

Panorama general de oferta y demanda de bioetanol para los años 2010 y 2015

Como se sintetizó en el Gráfico 40, las perspectivas de mercado para el bioetanol en las regiones evaluadas durante el período estudiado presentan grandes diferencias; por consiguiente, las condiciones y la capacidad de participar de un futuro mercado internacional para este biocombustible también son diferenciadas. Considerando estos mercados, en términos globales, se prevé para el año 2010 una demanda de bioetanol de 101 mil millones de litros, frente a una oferta estimada en 88 mil millones de litros, escenario que tiende al equilibrio en 2015, cuando la oferta deberá situarse cercana a los 162 mil millones de litros, frente a una demanda que rondará los 150 mil millones de litros.

Gráfico 40 – Estimaciones de oferta y demanda de bioetanol combustible para los años 2010 y 2015



Fuente: Modificado en base a Global Biofuels Center (2008).

En resumen, se proyecta para los próximos años un significativo aumento de la demanda en los Estados Unidos, principalmente debido a la nueva legislación que requiere el agregado anual adicional de 57 mil millones de litros de bioetanol a la gasolina en el año 2015. Por eso, ese país tendrá que recurrir a la importación, a no ser que nuevas vías de producción sean rápidamente viabilizadas.

En Europa, considerando la meta de un 5% en 2010 y un 7,5% en el 2015, la demanda de etanol también deberá expandirse de forma significativa. En Brasil, la demanda interna en fuerte expansión podrá ser bien abastecida por la producción local, con un gran potencial de participar activamente en un eventual mercado internacional de bioetanol. En las otras regiones estudiadas se espera un crecimiento moderado. No obstante, en Latinoamérica y el Caribe, varios países deberán prepararse mejor para alcanzar las metas nacionales, además de la eventual expansión de la producción volcada al mercado estadounidense, particularmente en aquellas naciones que pueden acceder a tal mercado en condición privilegiada.

Los países asiáticos y de Oceanía probablemente estarán limitados a cumplir con la demanda en el año 2010, pero podrían avanzar hacia el autoabastecimiento en el período hasta el año 2015. De acuerdo con el análisis desarrollado en los párrafos anteriores, Japón y China, y po-

tencialmente Australia y Nueva Zelanda deberán ser los grandes importadores de etanol en la región. Por otro lado, en el 2015, India, Indonesia y Tailandia podrán estar en la posición de exportadores, aunque seguramente sin la misma capacidad que Brasil [Global Biofuels Center (2008)]. Con relación a África, las incertidumbres son muy grandes, pero se puede imaginar un crecimiento moderado del mercado interno, con alguna posibilidad de exportación al mercado europeo, si éste se expandiera en un ritmo más acelerado.

Es importante observar que estas proyecciones se elaboraron entre fines del año 2007 e inicio del 2008, período de gran incertidumbre en el precio del petróleo. En caso de que los precios de referencia de los combustibles fósiles se consoliden en niveles elevados, es difícil prever cómo podrá comportarse la demanda de bioetanol, que es actualmente una de las pocas alternativas disponibles para sustituir la demanda de gasolina.

Para concluir esta revisión prospectiva del mercado global de bioetanol, es preciso mencionar que estimar y monitorear los flujos de este biocombustible en el mundo no son tareas fáciles, por causa de un sinnúmero de restricciones de acceso a las informaciones. Se espera que la cooperación internacional en este campo pueda contribuir para ampliar la base de datos e informaciones sobre los mercados de bioetanol, cuya mayor transparencia proporcionará beneficios para todos los países.

En la siguiente sección se comentan algunas de las políticas utilizadas para promover los biocombustibles en los principales países consumidores, las cuales representan una condición fundamental para que, en los próximos años, se desarrolle el potencial producción y, en consecuencia, los mercados de bioetanol discutidos en los párrafos anteriores.

8.4 Políticas de apoyo y fomento a los biocombustibles

En el ámbito institucional, las políticas y marcos legales asociados a los biocombustibles, definidos e implementados en grado variable de claridad y objetividad, constituyen elementos relevantes que explican y justifican la evolución de la demanda global de bioetanol presentada en las secciones anteriores. Para revisar estas políticas, la Tabla 40 presenta los principales propósitos y motivaciones de los programas de políticas públicas orientadas a biocombustibles y eventuales proyectos para su efectiva implementación, basados en documentos oficiales de la Unión Europea y varios otros países [GBEP (2007)].

De acuerdo con esa información, elevar la seguridad energética y mitigar los cambios climáticos son, en la mayoría de los países, los factores de motivación más importantes para programas bioenergéticos. Las cuestiones ambientales están más presentes en los países desarrollados, mientras que el potencial de los biocombustibles para promover el desarrollo rural es un factor impulsor destacado en el caso de los países en desarrollo, propósito casi

siempre relacionado con una agenda de combate a la pobreza. El aumento de la utilización de biocombustibles también es visto en estos países como una oportunidad para promover el acceso a una energía moderna, incluyendo la electrificación de las áreas rurales. Cabe destacar que los objetivos de desarrollo rural en países industrializados, de modo diverso, se concentran en la multifuncionalidad de la agricultura en términos de alimentos y productos ambientales y culturales.

Tabla 40 – Principales objetivos para el desarrollo de la bioenergía

País	Objetivos						
	Mitigar cambios climáticos	Mejorar el medio ambiente	Aumentar la seguridad energética	Promover el desarrollo rural	Estimular la agricultura	Fomentar el desarrollo tecnológico	Obtener ventajas económicas
Países +5							
África del Sur	X		X	X			
Brasil	X	X	X	X	X	X	X
China	X	X	X	X	X		
India			X	X		X	X
México	X	X	X	X		X	
Países del G8							
Alemania	X	X		X	X	X	X
Canadá	X	X	X			X	
Estados Unidos	X	X	X	X	X	X	
Francia	X		X	X	X		
Italia	X	X	X		X		
Japón	X	X			X	X	
Reino Unido	X	X	X	X			X
Rusia	X	X	X	X	X	X	
Unión Europea	X		X	X	X	X	

Fuente: GBEP (2007).

En países en desarrollo, los objetivos agrícolas vislumbran nuevas oportunidades, no sólo para la comercialización de la producción de cultivos energéticos sofisticados, sino también para la oferta en menor escala de productos más accesibles. Todos los países destacan en sus políticas por lo menos tres objetivos centrales, lo que puede dificultar el desarrollo de la bioenergía,

ya que alcanzar múltiples objetivos, muchas veces no totalmente compatibles, puede ser una tarea difícil. Es importante recordar que el énfasis en el desarrollo y en la protección de la producción agrícola en algunos países de la OCDE condujo a programas de biocombustibles no sostenibles [UN-Energy (2007)]. En pocas palabras, las políticas de fomento a los biocombustibles se orientan a objetivos múltiples y desafiantes, eventualmente más allá de las posibilidades de una transición de bases energéticas, que por si sola ya se configura compleja.

En muchos países, el desarrollo y el uso de la bioenergía se orientan, principalmente, por políticas del sector energético, especialmente mediante instrumentos de políticas para la promoción de la bioenergía, tal como se ejemplifica en la Tabla 41 [GBEP (2007)]. En esa tabla, las medidas voluntarias, particularmente para los biocombustibles, se refieren a la autorización para mezcla con combustibles convencionales y su progresiva introducción en el mercado, mientras que los incentivos directos comprenden los que son financiados por el poder público, como reducción de impuestos, subsidios, apoyo y garantía a préstamos relacionados con los biocombustibles. Obsérvese además que esta tabla presenta los instrumentos de políticas energéticas para bioenergía, separando los diferentes usos finales, como calefacción, generación de electricidad, transporte, etanol y biodiésel. Las políticas referentes a la Unión Europea son válidas para todos los países miembros; sin embargo, los países pueden establecer también otras medidas de carácter nacional, como se muestra en los casos de Alemania, Francia e Italia.

Como se puede observar en la Tabla 41, la gran mayoría de las medidas de política energética relacionadas con el fomento de la bioenergía están asociadas a los usos para generación de energía eléctrica, calefacción y transporte, con medidas específicas para el fomento de la producción de etanol y biodiésel sólo en el ámbito tributario y aduanero. En el caso del sector transporte la implementación de medidas de política presenta nexo inmediato con el fomento a los biocombustibles. También resulta evidente que buena parte de las medidas se encuentra en desarrollo o aguardando aprobación (presentado entre paréntesis en la tabla). En pocas palabras, los instrumentos para promover el bioetanol son conocidos y están en fase de progresiva implementación.

Levantamientos como los efectuados por el Worldwatch Institute [REN21 (2008)] confirman los importantes avances normativos en curso para ampliar el uso del bioetanol. Durante los últimos tres años, fueron promulgadas instrucciones normativas para la mezcla, en por lo menos 17 países a nivel nacional, la mayoría de los cuales establecía, de forma obligatoria, una mezcla del 10% al 15% de etanol con gasolina (o una mezcla del 2% al 5% de biodiésel con diésel combustible). Pueden citarse también las instrucciones normativas subnacionales relativas al bioetanol, con decisiones de gobiernos locales en 13 estados de India, 9 provincias chinas, 9 estados de los Estados Unidos, 3 provincias canadienses y 2 estados australianos, comprobando la relevancia de las condiciones, posibilidades e intereses locales.

Tabla 41 – Principales instrumentos de políticas energéticas relacionadas con la promoción de la bioenergía

País	Política Energética							
	Metas obligatorias	Metas voluntarias	Incentivos directos	Subvenciones	Tarifas aseguradas	Conexión obligatoria a la red pública	Criterios de sostenibilidad	Tributos diferenciales
Países +5								
Brasil	T	E	T					Et
China		E,T	T	E,T	E, H	E,H		n/a
India	T, (E*)		E	E,H,T	E			n/a
México	(E*)	(T)	(E)			(E)		Et
Sudáfrica		E, (T)	(E),T					n/a
Países del G8								
Canadá	E**	E**,T	T	E,H,T				Et
Francia		E*,H*,T	E,H,T		E			Et ; B
Alemania	E*,T		H	H	E	E	(E,H,T)	Et ; B
Italia	E*	E*,T	T	E, H	E	E		Et ; B
Japón		E,H,T				E		Et ; B
Rusia		(E,H,T)	(T)					n/a
Reino Unido	E*,T*	E*,T	E,H,T	E,H	E		T	Et ; B
Estados Unidos	T	E**	E,T	E,T				Et
Unión Europea	E*, T	E*,H*, T	T	E,H,T		E	(T)	Et ; B
Convenciones								
Tecnología bioenergética				*: la meta se aplica a todas las energías renovables				
E: electricidad				**: la meta está determinada a nivel subnacional				
H: calefacción				(..): instrumento de política aún en desarrollo o aguardando aprobación				
T: uso en transporte				n/a : no disponible o no informado				
Et: producción de bioetanol								
B: producción de biodiésel								

Fuente: GBEP (2007).

8.5 Vínculos entre alimentos y bioenergía

Al analizar las perspectivas de un mercado global de bioetanol, desarrollado sobre bases sostenibles, es esencial entender las interacciones entre los mercados de alimentos y la producción bioenergética, para una correcta evaluación de los efectos más amplios del incremento de la producción de biocombustibles, en sus diferentes configuraciones productivas. La fuerte elevación de los precios de los alimentos, observada en muchos países entre los años de 2007 y 2008, confirmó la importancia de evaluar adecuadamente el impacto del incremento de la producción de biocombustibles sobre la disponibilidad de alimentos y sobre el comportamiento de los precios de los productos agrícolas de interés alimentario.

Este tema se presentará en esta sección. Se inicia revisando los conceptos de seguridad alimentaria y evaluando sus requisitos frente a la expansión de la producción bioenergética, comentándose a continuación los principales factores que afectan el equilibrio entre la demanda y la oferta de alimentos. La función — actual y potencial — de los biocombustibles en ese escenario es un tema complejo. Las consecuencias e implicaciones de la bioenergía sobre la seguridad alimentaria pueden explorarse mediante modelos analíticos detallados, ya mencionados al inicio de este capítulo, para la estimación del potencial bioenergético, y que se presentarán como ejemplos de los esfuerzos en curso para la adecuada comprensión de esta problemática. Como un auxiliar poderoso para el correcto discernimiento de este escenario, se presentará la evolución de algunas series de precios del petróleo, vectores bioenergéticos y bienes agrícolas destinados a otros fines.

La seguridad alimentaria y la producción de bioenergía

La seguridad alimentaria es un tema central para la FAO, que la define como “la situación en que todas las personas tienen en todo momento acceso físico y económico a suficientes alimentos inocuos y nutritivos para satisfacer sus necesidades alimenticias y sus preferencias en cuanto a los alimentos a fin de llevar una vida activa y sana.” [FAO (2008b)]. También de acuerdo con esta institución, la seguridad alimentaria presenta cuatro dimensiones: disponibilidad, acceso, utilización y estabilidad, que se analizarán a continuación, considerando en particular su relación con la expansión de la producción bioenergética.

La dimensión de disponibilidad se refiere a la existencia de cantidades suficientes de alimentos de calidad adecuada, suministrados a través de la producción del país o de importaciones. En cuanto al impacto de la producción en este ámbito, es oportuno constatar que la utilización de tierras agrícolas para producción de materias primas de interés energético es muy bajo frente al área total cultivada. En efecto, actualmente, sólo cerca del 1% de las tierras arables del mundo se utiliza para la producción de biocombustibles líquidos, con perspectivas de aumento para el 3% a 4% en el año 2030 [BFS/FAO (2008)].

Del mismo modo, la posibilidad de que haya restricciones efectivas de superficie para producir alimentos y biocombustibles es baja, considerando que las áreas actualmente en cultivo, en todo el planeta (cerca de 1,5 mil millones de hectáreas), representan cerca de un 12% de las tierras cultivables. Además, una fracción importante de la producción actual de granos se destina a la alimentación animal, atendiendo de modo asimétrico las necesidades alimentarias de la población mundial. Esta situación ocurre, por ejemplo, con el maíz estadounidense y la soya brasileña, productos ampliamente utilizados en la elaboración de raciones para sistemas de producción animal con una relación producción/consumo calórico del orden del 15%.

Con idéntico propósito de producir proteína animal y presentando bajísima eficiencia de conversión, el área ocupada por pastos en todos los países es estimada en 3,5 mil millones de hectáreas, representadas básicamente por pastos nativos de limitada productividad. Si la productividad de esas áreas de pastoreo se incrementara en un 1%, mediante manejo adecuado y uso de forrajes de mejor desempeño, se liberarían 35 millones de hectáreas, área superior a los 23 millones de hectáreas estimados como suficientes para abastecer la adición del 10% de bioetanol de caña de azúcar en el mercado mundial de gasolina.

En rigor, estructuralmente, no son las limitaciones de área cultivable las que atentan contra la seguridad alimentaria y restringen las posibilidades de producción de biocombustibles. De la misma forma, la crisis actual en el mercado de productos alimentarios no es una crisis de insuficiencia en la producción de alimentos. La producción mundial de alimentos crece de forma sistemática y su oferta por persona aumentó un 24% en los últimos 40 años, pasando de 2.360 a 2.803 calorías diarias *per capita*, mientras que la población evolucionó de tres a seis mil millones de personas [FAO apud Ricupero (2008)].

Se debe reconocer que en años recientes se han presentado claros desbalances entre la oferta y demanda de cereales; sin embargo, ello se ha atribuido, de manera simplista, a la creciente producción de biocombustibles. En realidad, la elevada inflación en los precios de los alimentos se circunscribe a una problemática muy compleja, en la que, además de la expansión de los biocombustibles y de la demanda de materia prima asociada, intervienen muchos otros factores [(e.g. Rodríguez, 2008a, FAO, 2008, Trostle, 2008)]. Por el lado de la demanda, es notable el crecimiento del consumo per capita de cereales y proteínas animales en mercados importantes, particularmente en Asia (India y China). Por el lado de la oferta, la producción ha estado deprimida por problemas estructurales (e.g. caída en la tasa de crecimiento de los rendimientos) y coyunturales (debidos básicamente a eventos climáticos adversos), así como por costos más elevados de los insumos agrícolas, ámbito en el que destacan los efectos directos e indirectos de los altos precios del petróleo, en especial sobre los fertilizantes. Esas dinámicas de la oferta y la demanda han conducido a una caída de los inventarios, que se viene presentando desde principios de esta década. Como factores agravantes adicionales — y que han contribuido principalmente a la volatilidad de los precios observada durante los últimos dos años — se pueden citar la desvaloración del dólar; la política de bajas tasas de interés de la Reserva Federal de los Estados Unidos (para enfrentar la inestabilidad del sistema financiero derivada de la crisis en sector inmobiliario), la cual ha llevado a la búsqueda de

alternativa de inversión en mercados de materias primas; y vinculado a ello, el eventual incremento de movimientos especulativos en los mercados internacionales de materias primas agrícolas [e.g. Frankel 2008a y 2008b; Calvo 2008]. La explicación de la aceleración en el crecimiento de los precios, como resultado de la política de bajas tasas de interés seguida por la Reserva Federal, descansa en un marco analítico propuesto por Frankel (2006).

Algunos números son suficientes para confirmar lo anterior. China, uno de los principales importadores de alimentos en la actualidad, con cerca de un 20% de la población mundial y menos de un 10% de las tierras agroclivables, logró durante décadas mantenerse razonablemente abastecida de cereales con sus propios recursos agrícolas. Sin embargo, con el incremento de la renta y la diversificación de la dieta, que aumentó la demanda de proteínas animales, las importaciones de alimentos crecieron de manera importante a partir del año 2004. La demanda *per capita* de carne en China, que era de 20 Kg por persona/año en 1985, se elevó a 50 Kg en 2000, con expectativas de alcanzar 85 Kg en 2030 [SOW-VU (2007)], niveles típicos de los países de desarrollo medio a alto. Esta demanda de proteína animal eleva significativamente la demanda de granos, ya que, en promedio, para producir un kilo de carne de cerdo o vaca, se requirieren de 5 a 8 kilos de alimento.

Considerando la participación brasileña en este nuevo mercado, en el año 2007 se exportaron 11 millones de toneladas de soya a China. Considerando el promedio de la productividad nacional de 2,5 toneladas por hectárea [Abiove (2008)], ello significa el compromiso de 4,4 millones de hectáreas con el cultivo de esta oleaginosa, superior al área plantada con caña para fines energéticos en Brasil.

Como indicadores de la inflación en el mercado internacional de materias primas agrícolas de interés alimentario, entre 2000 y 2007, la elevación de los precios de los cereales fue del 225%, pero inferior al crecimiento de cerca del 330% en los precios del petróleo en el mismo período. El aumento de precios de los alimentos se intensificó en los últimos años, especialmente en el caso de algunos cereales importantes: de enero de 2007 a marzo de 2008, el maíz, el trigo y el arroz presentaron aumentos de precios en un 40%, 130% y 82%, respectivamente [Faostat (2008b)]. Más adelante se detallará mejor la evolución de los precios, conformando un escenario desafiador cuyo impacto es mayor sobre las naciones más pobres y dependientes de la importación de energía y alimentos. Hay perspectivas de que esta situación sea un reflejo de cambios estructurales en la economía mundial y pueda permanecer por muchos años [World Bank (2008)].

La participación del bioetanol de caña de azúcar como causa de esos desequilibrios y movimientos de precios es marginal, debido a lo reducido del área ocupada. Como se indicó en el capítulo anterior, el área requerida para producir el bioetanol de caña de azúcar necesario para sustituir el 10% del consumo mundial de gasolina, es hoy de cerca de 23 millones de hectáreas, equivalente al 1,5% del área cultivada o 0,2% del área agroclivable del planeta. Este argumento se confirma por el limitado impacto de la producción de bioetanol sobre los precios del azúcar, que se han mantenido en niveles más o menos estables en los últimos

años, comparativamente a los demás productos agrícolas, como se presenta más adelante en este capítulo.

No se puede afirmar lo mismo con relación a los biocombustibles producidos en base a bienes alimentarios esenciales. Un estudio del Fondo Monetario Internacional (FMI) sobre el crecimiento de la demanda de productos agrícolas indica que el maíz, la soya y la colza tendrán sus mercados fuertemente influenciados por la producción de bioenergía. Un buen ejemplo es el de la producción estadounidense de bioetanol, que responde por el 60% del incremento de la demanda global de maíz y afecta directamente sus precios. En efecto, los Estados Unidos, principal productor y exportador mundial de maíz, deberán consumir anualmente, hacia el 2011, cerca del 30% de su producción en la fabricación de bioetanol. De modo análogo, un aumento de la producción europea de biodiésel tiende a afectar el mercado de aceites vegetales [IMF (2007)].

En este sentido, es importante reconocer que la producción interna de biocombustibles de baja productividad en Estados Unidos y Europa presenta límites evidentes, pues involucra el aprovechamiento de nichos de producción, especialmente en casos de excedentes agrícolas, que alcanzan a representar un porcentaje pequeño del consumo interno de combustibles líquidos en estos países. Tal realidad crea una oportunidad para la producción racional y sostenible de biocombustibles en el contexto de países tropicales húmedos de América Latina y el Caribe, África y Asia, que progresivamente podría permitirle a los países de alto consumo energético alcanzar tasas de sustitución mucho más elevadas, sin afectar, de forma relevante la producción de otros bienes agrícolas y con un considerable potencial de desarrollo en estas regiones.

Por lo tanto, los impactos de los biocombustibles se pueden diferenciar, claramente, según su origen. Mientras el bioetanol de caña de azúcar producido en el contexto de países de elevada productividad, como los localizados en regiones de clima adecuado, afecta poco la producción de otros bienes agrícolas, los biocombustibles producidos en gran escala en el contexto estadounidense y europeo impactan directamente y de modo creciente en la disponibilidad de productos alimentarios. Además, su impacto sobre la demanda de productos agrícolas es agravado por las prácticas proteccionistas ampliamente adoptadas por los países industrializados, con serias implicaciones, en por lo menos dos vertientes. Por un lado, el mantenimiento de precios de protección para sus agricultores presupone la existencia de barreras arancelarias que dificultan o impiden el acceso de productos agrícolas oriundos de los países en desarrollo a los mercados de los países industrializados, desalentando la producción para exportación. Por otro lado (y peor), los excedentes de la producción subsidiada desequilibran de modo perverso el mercado mundial de bienes agrícolas, rebajando los precios internacionales y desestructurando la producción de alimentos en la mayoría de los países de menor renta.

Como ejemplo elocuente de las consecuencias de las distorsiones de precios en el mercado de bienes agrícolas, la gran producción de maíz en los Estados Unidos, con excedentes exportados a precios inferiores a los costos, promovió la reducción gradual de su cultivo en tradicionales productores de América Latina, como México, Colombia y Guatemala, a pesar

de ser milenarios practicantes de la agricultura de este cereal. Llevará algún tiempo hasta que las políticas agrícolas nacionales se coordinen en forma adecuada y se armonicen con las demandas de las políticas energéticas.

Naturalmente, los subsidios a la producción agrícola pueden ser instrumentos legítimos de política pública. Sin embargo, gran parte de los más de U\$S 280 mil millones aplicados anualmente por los países de la OCDE en el soporte a sus agricultores, que representan en promedio el 30% del rendimiento bruto de la actividad rural [OCDE (2007b)], sirven para reducir, de modo perverso, la producción de alimentos en los países en desarrollo, como se ilustra en el párrafo anterior. La revisión de estos subsidios es uno de los temas más difíciles de la agenda del comercio internacional, pero necesita ser encaminada urgentemente, como condición básica para retomar la racionalidad en la producción agrícola mundial. Ese contexto se extiende a los biocombustibles, un sector en el cual los pesados subsidios bloquean el comercio internacional y justifican sistemas productivos ineficientes, que terminan por desperdiciar bienes alimentarios, con magros beneficios en términos de los balances energético y de gases de efecto invernadero. En síntesis, la seguridad alimentaria puede verse afectada en caso de que los biocombustibles sean producidos en forma inadecuada, con baja productividad energética y utilizando recursos naturales en forma no sostenible. No obstante, este no es el caso del bioetanol de caña de azúcar.

Las demás dimensiones de la seguridad alimentaria son afectadas de modo menos intenso y evidente por la producción de los biocombustibles. El acceso se refiere a que las personas tengan los recursos adecuados para adquirir alimentos apropiados y una alimentación nutritiva. Depende primordialmente de las condiciones de renta de la población y de la infraestructura de transporte, almacenaje y distribución. El acceso a los alimentos tiende a ser favorecido en los contextos en que la producción bioenergética dinamice el sistema productivo rural y amplíe la renta de las familias. Sin embargo, puede ser afectado negativamente cuando la producción de biocombustibles causa incrementos significativos en el precio de los alimentos que reducen el poder de compra de la población. Este efecto sería mayor en los países o regiones en donde una proporción significativa de los ingresos se gasta en alimentos.

La dimensión de utilización se refiere al uso biológico de los alimentos a través de una alimentación adecuada, agua potable, sanidad y atención médica, para lograr un estado de bienestar nutricional en el que se satisfagan todas las necesidades fisiológicas. La FAO destaca que es un concepto que pone de relieve la importancia de los insumos no alimentarios en la seguridad alimentaria. Esta dimensión es poco probable que sea afectada de manera significativa por la producción de biocombustibles.

Finalmente, la dimensión de estabilidad se refiere a que una población, un hogar o una persona puedan tener acceso a alimentos adecuados en todo momento; por lo tanto se refiere tanto a la dimensión de la disponibilidad como a la del acceso de la seguridad alimentaria.

La producción de biocombustibles puede afectar la estabilidad si desplaza la producción de alimentos (disponibilidad). También puede afectarla si genera incrementos significativos en el precio de los alimentos (efecto negativo en acceso) o incrementa el precio ingreso de los agricultores (efecto positivo en acceso).

La producción de biocombustibles en Brasil es un buen ejemplo de cómo la producción de biocombustibles puede fortalecer la dimensión de estabilidad de la seguridad alimentaria. La fabricación de bioetanol estimuló el incremento en la producción de esta materia prima, sin embargo, su uso puede ser asignado entre la fabricación de etanol y de azúcar, dependiendo de la relación de precios entre ambos productos. Así, precios motivadores del bioetanol frente al azúcar tienden a reducir la oferta de azúcar y a estabilizar su precio. Estos impactos positivos sobre la estabilidad tienden a ser más efectivos cuando los mercados bioenergético y alimentario se muestran más integrados y menos afectados por barreras aduaneras.

En conclusión, la base de recursos naturales disponibles en el planeta es suficiente para la producción bioenergética sostenible en volúmenes razonables, con reducido impacto en otras actividades, siempre que se adopten vías tecnológicas razonables, como el bioetanol de caña de azúcar, cuyos indicadores diferenciados de productividad difícilmente se pueden asociar a una crisis de oferta y de precios de los alimentos. Además, en un sentido amplio, la adopción de tecnologías más eficientes, que reduzcan las pérdidas y mejoren los sistemas productivos agropecuarios, es tanto o más importante que la amplia disponibilidad de recursos naturales, como factor mitigador de la disputa por tierras y demás recursos productivos, entre la producción de alimentos y biocombustibles.

En efecto, el incremento de la productividad ofrece una alternativa inmediata a la mayor demanda de productos agrícolas que impone la expansión en la producción de biocombustibles. Un buen ejemplo de este proceso de tecnificación y densificación es el aumento de la producción de carne bovina y leche en Brasil en los últimos años. Como resultado del mejor manejo de las áreas de pasto y de su cultivo con forrajes de mayor calidad, se puede sostener un número mayor de animales por unidad de área, liberando tierras para otros fines. Los indicadores de los últimos 20 años son ilustrativos al respecto: el área de pastos en las propiedades rurales brasileñas se redujo casi en un 4%, mientras que el tamaño del rebaño se amplió en un 32% y la producción de leche creció un 67% [IBGE (2008)]. Analizando este tema de otra forma, en el año 2005, el promedio de la densidad de bovinos en el sector pecuario brasileño era de aproximadamente una cabeza por hectárea, mientras que en el estado de São Paulo esta densidad alcanzaba 1,4 cabeza por hectárea, o sea, un 40% más. Si las haciendas brasileñas pasaran a trabajar en el nivel de productividad observado en São Paulo, quedarían libres para la agricultura entre 50 y 70 millones de hectáreas [Jank (2007)], área que representa de dos a tres veces la superficie necesaria para producir suficiente bioetanol para una mezcla del 10% en la gasolina de todos los países.

Confirmando lo expuesto arriba, un grupo multidisciplinar [Best et al (2008)] llegó recientemente al consenso de que los aumentos recientes en los precios de las materias primas

agrícolas se pueden atribuir, en su mayoría, a factores que no están relacionados con la producción de biocombustibles. Como principales factores responsables de este aumento, este estudio señaló la creciente demanda por alimentos y raciones para animales, la especulación financiera en los mercados internacionales de productos alimentarios y pérdidas de cosecha causadas por eventos climáticos extremos. Además, los altos precios del petróleo y los altos costos relacionados con los fertilizantes impactan bastante sobre los precios internacionales de los productos agrícolas.

Modelos de evaluación del impacto de la producción bioenergética sobre la seguridad alimentaria

Una de las maneras utilizadas para evaluar la viabilidad de la expansión de la producción bioenergética, en un sentido amplio, es mediante modelos analíticos que relacionan los varios sistemas productivos y socioeconómicos involucrados, con sus funciones de producción y de demanda, definidas mediante ecuaciones matemáticas, reflejando la base de informaciones y datos existente. Tales modelos pretenden simular los efectos de la producción de biocombustibles en contextos y escenarios previamente definidos, para auxiliar en la toma de decisiones y en la implementación de políticas en el campo agrícola y bioenergético.

Como una de las más relevantes iniciativas en este sentido, la FAO lanzó en 2007 el Proyecto de Bioenergía y Seguridad Alimentaria (Bioenergy and Food Security Project – BEFS) [FAO (2008c)], que desarrolla una estructura analítica para evaluar las conexiones entre bioenergía y seguridad alimentaria, proponiendo un modelo a aplicar en países específicos. Se espera que este proyecto contribuya en el debate que ocurre actualmente en muchos países, caracterizando los beneficios y problemas asociados a la mayor utilización de la bioenergía. En la Figura 30, mostrada anteriormente, se sintetiza la amplia red de interacciones que se busca comprender y modelar en este proyecto.

En especial, el objetivo de la estructura analítica es evaluar el impacto de diferentes esquemas de producción y utilización bioenergética para la seguridad alimentaria, los cuales son específicos para cada país. El foco del análisis entre la bioenergía y la seguridad alimentaria es el cambio de la renta y de precios de los productos agropecuarios. Estos cambios dependen, principalmente, de las variaciones en los patrones de uso de la tierra, de los niveles de producción de bioenergía y alimentos y de los precios de mercado de los alimentos y energía. Tras la selección de un escenario determinado en un país, especificando los contextos productivos y las demandas para alimentos, bioenergía y otros productos agrícolas, son necesarias cinco etapas para la realización del análisis:

- i) determinación del “potencial técnico” para bioenergía, por medio del modelo comentado al inicio de este capítulo [ver Figura 30];
- ii) estimación de las curvas de costo para la oferta de alimentos y bioenergía;

- iii) estimación de los “potenciales económicos” para bioenergía;
- iv) estimación de los impactos macroeconómicos de la producción bioenergética sobre la renta, empleo y precios; y
- v) evaluación del impacto de los cambios en la renta, precio y empleo en la seguridad alimentaria.

Se pretende así evaluar en forma desagregada los diferentes grupos poblacionales que puedan ser afectados por el desarrollo de la bioenergía, dependiendo del escenario para su expansión en el país estudiado. Se están implementando estudios piloto de este proyecto en Perú, Tanzania y Tailandia, y podrán ser expandidos a otros países.

Modelos similares han sido desarrollados por el Instituto Internacional de Investigación sobre Políticas Alimentarias (International Food Policy Research Institute - IFPRI) y por el Departamento de Agricultura del gobierno de los Estados Unidos (United States Department of Agriculture – USDA). En el caso del IFPRI, el Modelo Internacional para el Análisis de Política de Materias Primas y Comercio Agrícola (International Model for Policy Analysis of Agricultural Commodities and Trade – IMPACT), fue utilizado para evaluar las condiciones futuras de oferta y consumo de alimentos y seguridad alimentaria para el año 2020 y años posteriores, considerando tres categorías de demanda: alimento humano, alimento animal y otros usos, ajustados para considerar los biocombustibles. Las materias primas consideradas fueron maíz, caña de azúcar, remolacha, trigo y yuca para la producción de bioetanol, y soya y otras semillas oleaginosas para el biodiésel. En base a las proyecciones de demanda de biocombustible por los países y regiones pertinentes, la producción de biocombustibles en este modelo fue considerada a partir de tres escenarios de productividad y tecnologías.

Entre las principales conclusiones de este estudio, destaca el incremento significativo en los precios de los productos agrícolas, especialmente de la yuca, sobre todo cuando la productividad agroindustrial es baja, lo que confirma la importancia de que los biocombustibles se desarrollen en un marco de eficiencia [IFPRI (2006)].

El modelo utilizado por el USDA para evaluar los precios agrícolas como resultado de la expansión de la producción de biocombustibles, desarrollado por el Servicio de Estudios Económicos (Economic Research Service – ERS) de este órgano, muestra una situación un poco distinta, en la cual el perfil de la demanda (con el incremento de la demanda de proteínas animales), los efectos climáticos y los precios de la energía tienen una función más significativa que la bioenergía sobre el aumento de los precios. En este sentido, este estudio señala que sólo el 3% del incremento en el precio de los alimentos se debe a la producción de bioetanol e indica que los altos precios del petróleo son la causa más importante. Al analizar la evolución de los precios entre 1992 y 2008, se observa que el petróleo aumentó un 547%, las materias primas (básicamente metales) aumentaron un 286% y, en general, los alimentos se

elevaron un 98%, estimándose que a lo largo de los próximos años el mercado se equilibrará en niveles más adecuados [ERS (2008)].

La significativa diferencia de visiones encontrada en los dos modelos anteriores evidencia la limitación del enfoque de modelos matemáticos, asociada a la dificultad de simular sistemas complejos, bajo condiciones transitorias y con comportamientos típicamente estocásticos. La salida usual es ampliar la complejidad de las matrices utilizadas, aumentando el número de variables; sin embargo, como contrapartida se tiene una crónica carencia de datos suficientemente detallados para que el modelo concebido pueda ser adecuadamente calibrado e implementado. Se mantiene, así, la visión estática de la realidad, lo que limita bastante su alcance en el tiempo y la robustez de sus indicaciones en contextos más variados. No obstante, tales modelos son herramientas de efectivo interés, que compensan la escasa capacidad predictiva con la efectiva aplicación como herramienta exploratoria de escenarios, posiblemente en forma más cualitativa que cuantitativa. Se cree que oportunamente se podrán desarrollar modelos más elaborados, que incorporen lógicas adaptativas, capaces de simular dinámicamente las interacciones entre los sistemas socioeconómicos y la bioenergía.

Evolución de los precios internacionales de interés para el binomio alimentos-bioenergía

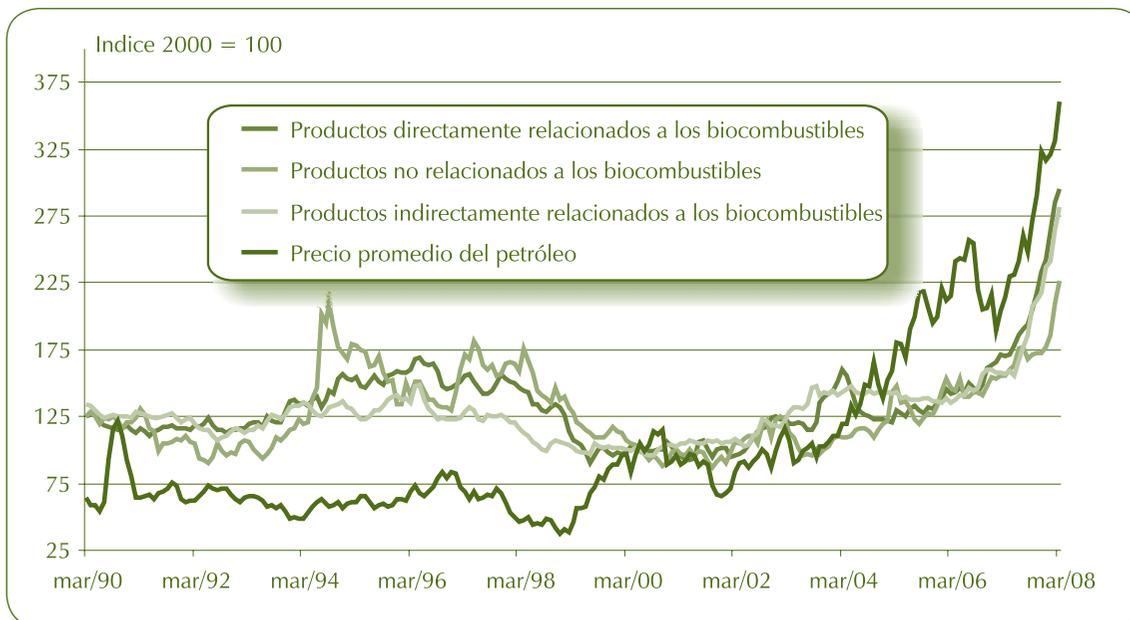
Con el propósito de darle más consistencia a la relevante discusión sobre los nexos entre la producción de biocombustibles y los precios de los alimentos, así como para tratar de caracterizar eventuales relaciones entre los precios de los diferentes grupos de productos, se presenta a continuación un conjunto de figuras que sintetizan la evolución de los precios internacionales más relevantes entre marzo de 1990 y marzo de 2008, a partir de datos del Banco Mundial. Se parte de un caso general y se continúa hacia comparaciones más específicas. Se consideran diferentes categorías de productos agrícolas comercializados internacionalmente, agregados según su relación sea directa, indirecta o no relevante con la producción de biocombustibles. En el primer grupo se incluyen el azúcar (que acompaña el precio de la caña de azúcar), el maíz, el aceite de soya y el aceite de palma; en el segundo grupo figuran la carne y el trigo; y en el último el cacao, los cafés arábica y robusta, el té y los bananos. Con estos gráficos no se pretende demostrar relaciones de causa y efecto, sino constatar y evaluar la creciente vinculación entre el comportamiento de los precios en los mercados internacionales del petróleo y de los productos agrícolas, la cual puede explicarse por diversas razones, entre ellas, la expansión de la bioenergía.

El Gráfico 41 ilustra la evolución de los índices de precios del petróleo crudo y tres índices simples de precios de productos agrícolas, agrupados en función de lo indicado en el párrafo anterior. Desde el inicio de 2002, aproximadamente, los precios de todos los productos agrícolas siguieron la tendencia general determinada por el precio del petróleo crudo, tendencia que se volvió más clara a partir de marzo de 2007, cuando las materias primas directa o indirectamente relacionadas con la producción de biocombustibles aumentaron a una tasa

bastante similar a la del petróleo y de modo bastante más rápido que los productos no relacionados con los biocombustibles.

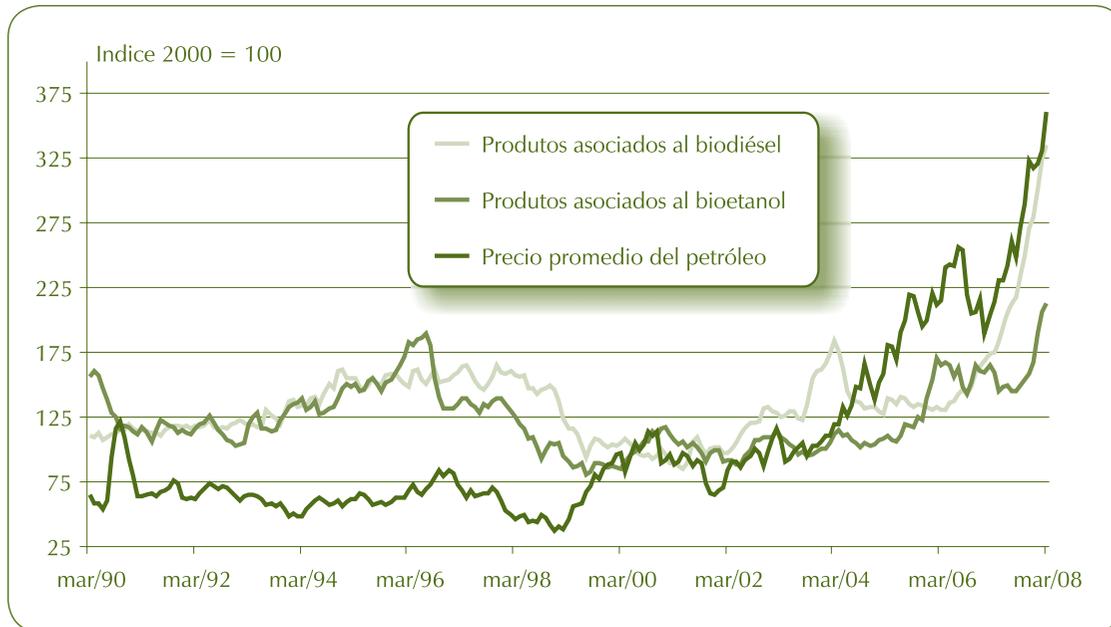
En el Gráfico 42 se distinguen los productos asociados al biodiésel (aceites vegetales, de soya y de palma) y al bioetanol (azúcar y maíz). Ambos grupos de productos muestran, desde el inicio del año 2002, una tendencia de subida de precios; sin embargo, durante los dos últimos años las materias primas relacionadas al biodiésel han aumentado a un ritmo mucho más acelerado que los productos asociados al bioetanol, aproximándose bastante al ritmo de crecimiento de los precios del petróleo.

**Gráfico 41 – Índices de precios para el petróleo y los productos agrícolas
(Promedio 2000 = 100)**



Fuente: Unidad de Desarrollo Agrícola, Rodríguez (2008b).

**Gráfico 42 – Índices de precios para el petróleo y los productos agrícolas asociados al bioetanol y al biodiésel
(Promedio 2000 = 100)**

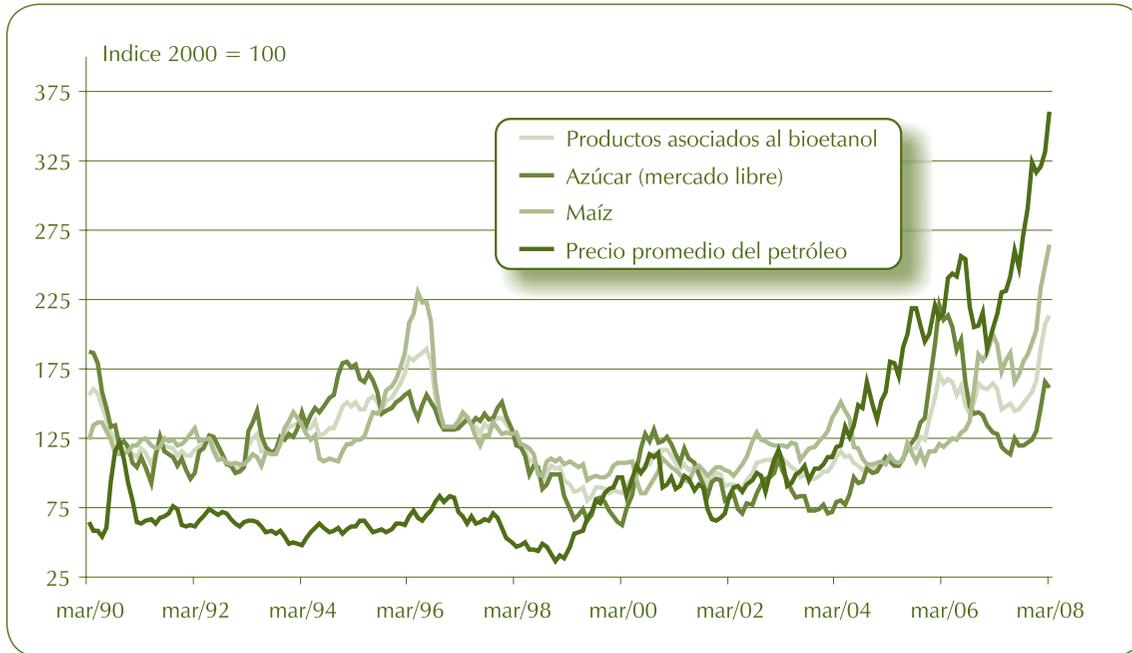


Fuente: Unidad de Desarrollo Agrícola, Rodríguez (2008b).

En el Gráfico 43 se analizan los productos directamente asociados al bioetanol: el azúcar y el maíz. Es interesante observar que sus precios evolucionaron en direcciones opuestas, especialmente desde el año 2002 hasta mediados del 2007. Desde entonces, ambos precios han aumentado de manera constante, acompañando el crecimiento de los precios del petróleo.

En julio de 2006, el precio del petróleo alcanzó un pico, presentó una caída hasta enero del año 2007 y ha estado aumentando de manera constante desde entonces. Luego del pico de julio 2006 los precios del azúcar y del maíz comenzaron a caer, pero la reducción fue más significativa y duró más en el caso del azúcar que en el del maíz. Recientemente, los precios de los dos productos volvieron a aumentar, aunque con algún rezago respecto del aumento de precios del petróleo que comenzó en febrero de 2007. En el caso del maíz el aumento se dio a partir de mayo y en el caso del azúcar a partir de octubre de 2007. No obstante, el aumento fue mucho mayor en el caso del maíz, que alcanzó su precio promedio mensual más alto en marzo de año 2008, un 14,4% más que el pico histórico anterior, en mayo de 1996. A su vez, el precio promedio del azúcar, en marzo de 2008, quedó un 25% por debajo del máximo nivel histórico, alcanzado en febrero de 2006. En otras palabras, el precio del azúcar, que se relaciona directamente con el precio de la caña de azúcar, aumentó mucho menos que el del maíz.

Gráfico 43 – Índices de precio para el petróleo bruto y los productos agrícolas asociados al bioetanol (Promedio 2000 = 100)



Fuente: Unidad de Desarrollo Agrícola, Rodríguez (2008b).

Para concluir con el análisis sobre el comportamiento de los precios y confirmando las constataciones anteriores, la Tabla 42 resume la relación entre la evolución de los precios del petróleo y los precios de los productos agrícolas directamente vinculados a la producción de biocombustibles. En esta tabla se utiliza el coeficiente de correlación simple, parámetro estadístico que a medida que se aproxima a la unidad indica cuánto más fuerte y positiva es la relación entre dos variables. Valores nulos indican ausencia de relación y valores negativos señalan una relación inversa, que se fortalece conforme el valor se acerca a -1. De acuerdo con los valores de la Tabla 42, en el caso de bioetanol existen diferencias importantes entre el maíz y el azúcar; y en el caso del biodiésel hay un cambio en la magnitud y dirección de la relación entre sus precios y los de petróleo, desde una relación débil y negativa en la década de los noventa, hacia un vinculación que se torna fuerte y positiva durante la presente década y que se fortalece más aún después de 2005.

Tabla 42 – Coeficientes de correlación simple entre los precios del petróleo y los precios de los productos directamente asociados a los biocombustibles, entre enero de 1990 y marzo de 2008, por subperíodos

Producto	Periodo			
	1990 a 2008	1990 a 1999	2000 a 2008	2005 a 2008
Maíz	0.43	0.04	0.76	0.74
Azúcar	0.21	0.03	0.68	0.22
Aceite de soya	0.61	-0.41	0.82	0.89
Aceite de palma	0.42	-0.44	0.81	0.86

Fuente: Unidad de Desarrollo Agrícola, Rodríguez (2008b).

Como se indica en los Gráficos 41, 42 y 43 y en la Tabla 42, hay una relación clara entre los precios del petróleo y los de los productos agrícolas relacionados a los biocombustibles. Sin embargo, en el caso del azúcar la relación es mucho menor que para otros insumos de biocombustibles. A medida que la investigación en este campo se expanda y surjan más datos el debate internacional se volverá más rico y las diversas influencias sobre los precios mundiales de los alimentos quedarán cada vez más claras, reduciendo las especulaciones sobre este tema.

8.6 Factores de inducción para un mercado global de bioetanol

Desde una perspectiva amplia, la adopción del bioetanol como un componente de la matriz energética mundial se asocia a algunos factores que se deben mencionar, debido a su relevancia y al creciente significado que tienen como parte del conjunto de motivaciones que soportan este biocombustibles, entre las que destacan la existencia de potenciales productivos robustos, demandas crecientes y mercados en consolidación, con impactos delimitados sobre la disponibilidad de alimentos y sus precios, tal como se ha indicado a lo largo de este capítulo. De los párrafos anteriores sobresale también la gran importancia que presentan las acciones de Estado, como motivador de ese proceso, potenciando sus ventajas y atenuando sus riesgos bajo la égida de los intereses mayores de la sociedad. Es en ese contexto que resulta importante realizar algunos comentarios complementarios, resaltando los temas relativos al papel del bioetanol de caña de azúcar en la agenda ambiental global y en el escenario de las negociaciones internacionales, para fortalecer el comercio entre los países.

Desafíos ambientales globales y el bioetanol

Los biocombustibles, incluyendo el bioetanol, son analizados de forma detallada en las negociaciones globales relacionadas con el medio ambiente, principalmente en la Convención sobre

Diversidad Biológica (Convention on Biological Diversity - CBD) y en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. A continuación, se resumen los puntos más importantes en esas negociaciones.

En el marco de la Convención sobre Diversidad Biológica, los biocombustibles fueron el objeto de una recomendación específica de la 12ª Sesión del Órgano Subsidiario de Asesoramiento Científico y Tecnológico (Subsidiary Body on Scientific, Technical and Technological Advice -|SBSTA) de esta convención [CBD (2008)]. Tal recomendación se refiere a los aspectos positivos y adversos de la producción de biocombustibles líquidos y su utilización para la “biodiversidad y bienestar humano”. Se indica que los efectos benéficos surgen cuando su producción y su uso están asociados, entre otros aspectos, con: la reducción del consumo de combustibles fósiles; la reducción del uso de la tierra para fines agrícolas asociados con el aumento en la producción de energía; la disminución del uso del agua de las plantaciones; la reducción de la conversión de tierras agrícolas para otros fines; y el aumento de la renta y de las oportunidades económicas en áreas rurales.

Por otro lado, la misma recomendación indica que los efectos adversos se dan cuando el uso y la producción de biocombustibles se asocian a: la pérdida, la fragmentación y la degradación de biomas valiosos, tales como bosques naturales, campos, pantanos y tierras con turbas y otros depósitos de carbono, así como con pérdida de servicios ambientales esenciales de los ecosistemas y aumentos en las emisiones de gases de efecto invernadero debido a esos cambios; la competencia por tierra con plantaciones alternativas, incluyendo la tierra administrada por comunidades indígenas y pequeños agricultores; la competencia con la producción de alimentos, que puede llevar a la inseguridad alimentaria, aumento en el consumo de agua, mayor aplicación de fertilizantes y pesticidas, aumento de la contaminación de agua y eutrofización, degradación y erosión del suelo; el cultivo no-controlado y la introducción y diseminación de organismos genéticamente modificados; y la introducción descontrolada y la diseminación de especies invasivas extrañas y las emisiones de la quema de biomasa, con posibles efectos adversos para la salud humana.

Por lo tanto, las recomendaciones de la CBD/SBSTA convergen en muchos temas vinculados a la sostenibilidad de la producción de bioetanol de caña de azúcar discutidos en capítulos precedentes, como los relativos a los balances de energía y emisiones (locales y globales), impactos sobre los recursos naturales, diversidad biológica, producción agrícola, uso de la tierra y criterios sociales.

El tema de los biocombustibles también se discute en el contexto de los foros de la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático, por sus vinculaciones con el cambio climático y las emisiones de gases de efecto invernadero, derivadas del uso de combustible y de las actividades de reforestación/deforestación, cambio en el uso de la tierra y otras formas de adaptación y mitigación de las alteraciones del clima [UNFCCC (2008)]. El Protocolo de Kyoto, resultante de esta convención, establece metas y compromisos para los países industrializados en la reducción de las emisiones, identificando mecanismos que per-

mitan que estos países adquieran y comercialicen créditos en emisiones por medio de proyectos ejecutados en países en desarrollo, los cuales se pueden usar para cumplir sus compromisos. Entre ellos, se destaca el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), cuyos proyectos se deben asociar a objetivos de desarrollo sostenible, involucrando actividades que no habrían ocurrido de otra forma y resulten en reducciones reales y cuantificables de emisiones.

Los dos tipos más comunes de proyectos presentados están relacionados al uso de la tierra y a la producción de energía. En esos ámbitos existe potencial para proyectos dirigidos a la producción y al uso de bioetanol, aunque es un tema poco investigado. No obstante, existen ejemplos de diversos proyectos MDL en marcha o planeados, relacionados a la bioenergía, con informaciones disponibles sobre las metodologías que se pueden utilizar para el cálculo de la reducción de las emisiones [CDM (2008)]. Un ejemplo que se comentó anteriormente en este libro es la cogeneración de electricidad con bagazo de caña.

Es claro entonces que un mercado de bioetanol expandido, si se promueve con criterios de sostenibilidad, debe contribuir para que los países productores y consumidores de ese biocombustible puedan cumplir los objetivos de los acuerdos ambientales internacionales.

Comercio internacional de bioetanol

Como ya se planteó en este capítulo, hay desafíos importantes asociados a la formación de un mercado internacional para el bioetanol. Por ejemplo, medidas aduaneras de carácter proteccionista y estándares de calidad desequilibrados pueden afectar las oportunidades de los países en desarrollo, potenciales productores, para acceder a ese mercado internacional. Igualmente restrictivas para la formación de ese mercado son las medidas que buscan exclusivamente el incremento de la producción en países industrializados. Existe también la preocupación de que el aumento de las tarifas sobre los biocombustibles en los mercados de países industrializados obligue a los países en desarrollo a exportar insumos, tales como melazas y aceites vegetales en bruto, dejando en el país importador la fase industrial de la producción de los biocombustibles, con la consiguiente pérdida los beneficios asociados al valor agregado. La tasa *ad valorem* de 6,5% sobre las importaciones de biodiésel a la Unión Europea y la tarifa de 0,54 U\$/galón (0,142 U\$/litro) sobre el etanol importado por los Estados Unidos son ejemplos de barreras arancelarias proteccionistas, que restringen el comercio de los países en desarrollo con algunos de los más importantes mercados consumidores de biocombustibles.

En años recientes se han desarrollado algunos acuerdos e iniciativas de promoción del comercio preferencial con la Unión Europea y con los Estados Unidos, mediante los cuales se ha buscado ofrecer oportunidades para que países potencialmente exportadores de bioetanol se beneficien del aumento en la demanda global de ese biocombustible. Por ejemplo, las iniciativas *Todo Menos Armas* (Everything But Arms - EBA) y el *Acuerdo de Cotonou* (sucesor de la Convención de Lomé), que afectan directamente el sector de bioetanol, se enmarcan dentro del Sistema Generalizado de Preferencias (Generalised System of Preferences - GSP)

de los países europeos, que regula el comercio preferencial entre la Unión Europea y los países en desarrollo. De acuerdo con el GSP actual, en vigor hasta el 31 de diciembre de 2008, los países que califican pueden exportar a la Unión Europea, libre de tarifas, alcohol desnaturalizado o no desnaturalizado. El GSP también tiene un programa de incentivos para productores y exportadores de etanol que se adhieran a los principios de desarrollo sostenible y buena gobernabilidad [European Commission (2005)].

La iniciativa EBA le ofrece a los países menos desarrollados la posibilidad de exportar etanol libre de tarifas y cuotas, mientras que el Acuerdo de Cotonou ofrece acceso libre a ciertas importaciones oriundas de países de baja renta de África, del Caribe y de la región del Pacífico. De forma similar, el Acuerdo Euro-Mediterráneo (Euro-Mediterranean Agreement) también tiene disposiciones para el comercio preferencial en biocombustibles para ciertos países del Oriente Medio y del norte de África.

En los Estados Unidos, como se comentó, se puede importar etanol sin tarifas desde algunos países de Centroamérica y el Caribe, en el marco de la Iniciativa de la Cuenca del Caribe (Caribbean Basin Initiative); sin embargo, existen restricciones específicas (cuantitativas y cualitativas), dependiendo del país de origen de la materia prima, como se comentó anteriormente. También ya existen acuerdos firmados para las importaciones de etanol libre de tarifas en el Acuerdo de Libre Comercio entre América Central, República Dominicana y los Estados Unidos. Aunque estos acuerdos no alteren el marco general de restricciones al comercio de biocombustibles, representan saludables excepciones y deben ser valorados.

Las cuestiones clave para la promoción del comercio internacional de bioetanol incluyen: la clasificación para fines arancelarios de los productos biocombustibles como bienes agrícolas, industriales o ambientales; la función de los subsidios en el aumento de la producción; y la consistencia entre las diversas medidas en el ámbito doméstico y los requisitos de la Organización Mundial del Comercio (OMC). Dado que la agroindustria de los biocombustibles no existía cuando las reglas actuales de la OMC fueron elaboradas, no están sujetos al sistema de clasificación HS (Harmonized Standard o Norma Harmonizada). Ello genera incertidumbre, pues esta es la norma que caracteriza los productos dentro de los acuerdos específicos de la OMC. Por ejemplo, el bioetanol es considerado actualmente un producto agrícola y, por lo tanto, está sujeto al Anexo 1 del Acuerdo sobre Agricultura (Agreement on Agriculture - AoA) de la OMC; por el contrario, el biodiésel es considerado un producto industrial y por lo tanto no está sujeto a las reglas del AoA.

Algunos miembros de la OMC han sugerido que los combustibles renovables, incluyendo el bioetanol, deberían ser clasificados como “productos ambientales” y, por lo tanto, estar sujetos a negociaciones bajo el grupo de “Productos y Servicios Ambientales” [Steenblik (2005)]. En este contexto, en el marco de la Ronda de Doha se iniciaron negociaciones sobre “la reducción o, cuando sea apropiado, la eliminación de barreras arancelarias o no arancelarias para bienes y servicios ambientales”, pero aún continúan las discordancias sobre la identificación de los productos ambientales, sobre el alcance y enfoque a utilizar en la liberación

del comercio en estos productos y sobre los mecanismos para actualizar regularmente la lista de productos.

Los biocombustibles continuarán siendo un factor importante en los tratados de la Ronda de Doha. Algunos analistas sugieren que, por su impacto en los mercados agrícolas, los biocombustibles pueden salvar las negociaciones sobre el comercio agrícola que vienen siendo encaminadas con dificultad por la OMC [Turner (2006)]. Otros son más pesimistas y consideran que las nuevas oportunidades comerciales que están surgiendo en los países industrializados, con el fuerte interés en biocombustibles, probablemente no serán protegidas por el sistema basado en reglas de la OMC, sino por formas menos confiables de decisiones unilaterales de un país para permitir que importaciones atiendan una determinada demanda doméstica [IIED (2007)].

Dentro de este esquema, una tarifa podría continuar existiendo, pero no sería aplicada, o se aplicaría una tarifa más baja para un determinado volumen de importaciones, antes de que la tarifa máxima sea aplicada. De este modo, las fronteras se podrían cerrar nuevamente, sin posibilidad de recurso para el país o empresa exportadora, en caso de que sea posible comprobar que las importaciones son políticamente sensibles, porque los productores o procesadores locales fueron amenazados, o porque los estándares ambientales existentes en la producción del biocombustible importado fueron considerados inadecuados por los consumidores.

Las condiciones que enmarcan la Ronda de Doha reproducen bien las dificultades para las negociaciones globales encaminadas a la construcción de un mercado saludable para los biocombustibles. Es en ese contexto que los países productores tienen que tomar decisiones y definir estrategias para el fomento del bioetanol, buscando atender adecuadamente sus perspectivas de desarrollo y las demandas de energía, agricultura y comercio. Esas estrategias se deberán evaluar a la luz de los beneficios económicos, equidad de estos beneficios, límites ambientales, balances energéticos nacionales y oportunidades internacionales de comercio, considerando la entrada en un futuro mercado internacional de bioetanol o priorizando el uso del bioetanol nacional para el desarrollo rural y para el suministro de energía para uso doméstico.

Estas decisiones dependerán, principalmente, de la perspectiva que un país establece para el bioetanol. Una visión de corto plazo para la producción y el consumo podría priorizar el enfoque hacia las exportaciones y a la garantía del suministro energético, mientras que una visión de largo plazo podría dar preferencia a la igualdad social en el desarrollo rural y a los beneficios ambientales mundiales. Sin embargo, es importante notar que los mercados nacionales pueden pavimentar el camino para el comercio internacional, al establecer la infraestructura necesaria y proveer la experiencia en la gestión de los sistemas productivos asociados a los biocombustibles.

En todo caso, es fundamental reconocer que, la proposición de programas coherentes para la producción y el uso de biocombustibles — particularmente de bioetanol, en países en donde esta tecnología energética todavía no existe — hace imperativo que se realicen evaluaciones y estudios previos suficientemente detallados y amplios, que apoyen el establecimiento de metas coherentes con la base de recursos existentes. La bioenergía no es una panacea, pues es un hecho que ella sola no será suficiente para cubrir la demanda energética del mundo moderno, y más bien sus ventajas se potencializan en contextos específicos, como fue reiteradamente destacado en este trabajo. Posiblemente, la mayor recomendación en ese sentido sea valorar el agregado de conocimiento y proceder a un análisis riguroso de las implicaciones energéticas, ambientales, económicas y sociales.

Como conclusión, se puede decir que el mercado global para el bioetanol deberá ser una realidad en pocos años. Su magnitud y alcance entre los países dependerá de diversos elementos que aún se están delineando, tales como decisiones políticas de los países relativas a sus mercados internos, discusiones sobre criterios de sostenibilidad, negociaciones de comercio internacional, y reacciones de la sociedad civil, tanto en países en desarrollo como industrializados. Todo ello configura una ecuación compleja y dinámica. Sin duda, el bioetanol presenta un potencial global y, por lo tanto, exige la cooperación mundial.



Capítulo 9

**Una visión de futuro del bioetanol
como combustible**

La sociedad moderna viene enfrentando el aumento de la degradación ambiental, al mismo tiempo que toma conciencia de la existencia de límites en sus reservas de recursos naturales, sean éstos energéticos, hídricos o minerales. Este escenario, en el cual la energía desempeña un papel central, ha venido exigiendo la urgente reconsideración de un modelo de suministro que presenta señales de agotamiento y que necesita incorporar nuevos recursos energéticos que permitan darle continuidad al proceso de desarrollo socioeconómico. Como alternativa, en un marco de escasez, el uso de la energía solar representa una fuente aún subutilizada por la humanidad. En efecto, sólo una fracción mínima de la radiación solar que incide en el planeta es aprovechada actualmente mediante procesos tecnológicos, a pesar del enorme potencial para su utilización que, sin embargo, presupone medios eficientes y competitivos para su viabilización. Es en ese contexto que se presenta la bioenergía, como una de las mejores alternativas para captar y almacenar la energía solar, siempre que se disponga de tierras libres, clima adecuado (luz, agua y temperatura) e, igualmente importante, conocimiento suficiente y disposición emprendedora para explotarlo. En este sentido, es oportuno recordar la reflexión visionaria de Henry Ford, publicada en 1934:

I foresee the time when industry shall no longer denude the forests which require generations to mature, nor use up the mines which were ages in the making, but shall draw its raw material largely from the annual products of the fields. I am convinced that we shall be able to get out of the yearly crops most of the basic materials which we now get from forest and mine [Modern Mechanix (1934)].¹

Especialmente apta para el suministro de combustibles vehiculares, la energía solar en la forma de bioetanol de caña de azúcar, producido con eficiencia y sostenibilidad, se destaca entre todas las energías renovables disponibles. Además, este *combustible solar* es capaz de atender las urgentes demandas para la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, mejorar la calidad del aire en las metrópolis y ser competitivo frente a energías convencionales. Por otra parte, la explotación del bioetanol de caña de azúcar puede proporcionar una nueva dinámica agroindustrial para los países tropicales que cuenten con suficiente disponibilidad de tierras y busquen superar esquemas energéticos concentrados y ambientalmente problemáticos, mejorando su seguridad energética y promoviendo su crecimiento económico.

En las páginas precedentes se destacó — con los detalles y fundamentos posibles dentro del alcance del presente trabajo — cómo la producción de bioetanol de caña de azúcar, asociada a la generación de energía eléctrica y a la producción de alimentos y biomateriales, presenta indicadores muy interesantes de productividad y es actualmente una buena alternativa para utilizar trabajo, tierra, agua y sol en la producción de biocombustibles. También se buscó mostrar cómo esta alternativa energética posee un buen potencial de perfeccionamiento, mediante la valorización de los subproductos y la racionalización de los procesos agroindus-

¹ “Preveo el momento en que la industria no talará más bosques que demoran generaciones para crecer, ni utilizará productos minerales formados durante eras, sino que buscará su materia prima principalmente a partir de lo que los campos producen cada año. . Estoy convencido de que seremos capaces de obtener de la agricultura la mayor parte de las materias básicas que hoy recibimos de los bosques y de las minas.”

triales, que permitirían a mediano plazo superar los diez mil litros de etanol por hectárea, con una reducida demanda energética exógena y con emisiones de gases de efecto invernadero del orden de un décimo del valor correspondiente a los derivados del petróleo, para el mismo efecto energético final.

La experiencia brasileña en este ámbito — después de muchas décadas de aciertos y errores, con centenas de unidades productoras y millones de vehículos funcionando normalmente, abastecidos con un combustible que pocos meses antes era sólo agua, gas carbónico en la atmósfera y la luz del sol en las hojas de la caña de azúcar — puede servir como una referencia para otros países con contextos semejantes. Son muchos los países en condiciones de adoptar programas bioenergéticos eficientes, adecuando la extensa experiencia de Brasil a sus características, potencialidades y mercados; sin embargo, muchas naciones todavía dudan de la eficiencia y eficacia de este tipo de alternativa energética.

Del mismo modo, muchos países vienen buscando reducir su dependencia energética, reducir sus emisiones de dióxido de carbono y mejorar la calidad del aire en sus ciudades. Sin embargo, en general no incluyen el uso de bioetanol de caña de azúcar como una alternativa, levantando barreras que protegen medios poco eficientes y sostenible. En ese sentido, es posible afirmar que hay cierta falta de información y un limitado conocimiento del potencial del bioetanol de caña de azúcar, incluso por parte de las autoridades en temas energéticos y ambientales. Uno de los principales objetivos del presente trabajo ha sido proporcionar información más consistente y objetiva sobre esta fuente energética.

A continuación se destacan las características más importantes del bioetanol de caña de azúcar, sobre la base de una experiencia de décadas en Brasil con este biocombustible, que lo configura como una opción energética estratégica y sostenible factible de ser replicada y adaptada en otros países con disponibilidad de tierras y condiciones edafoclimáticas adecuadas:

1

El bioetanol puede ser utilizado en motores vehiculares, puro o mezclado con gasolina, con buen desempeño y empleando esencialmente el mismo sistema de distribución y almacenamiento existente para la gasolina. En concentraciones de hasta el 10% los efectos del bioetanol son casi imperceptibles sobre el consumo de los vehículos, los cuales pueden, en esos niveles, emplear este biocombustible en sus motores sin ninguna modificación.

2

El bioetanol de caña de azúcar se produce con elevada eficiencia en la captación y en la conversión de energía solar (relación producción/consumo de energía superior a 8), con productividad agroindustrial bastante superior a los demás biocombustibles, alcanzando cerca de ocho mil litros por hectárea (tecnología actual) y significativa disponibilidad de excedentes energéticos, tales como biocombustibles sólidos (bagazo y paja) y, principalmente, bioelectricidad.

3

El bioetanol de caña de azúcar, producido en Brasil se muestra competitivo con el petróleo cuando el precio del barril es de alrededor de U\$S 45. El costo final de producción del bioetanol está determinado principalmente por el costo de su materia prima. La tecnología empleada para su producción está comercialmente disponible, y se puede introducir progresivamente en la agroindustria cañera productora de azúcar.

4

Los impactos ambientales de locales de la producción del bioetanol de caña de azúcar sobre los recursos hídricos, el suelo y la biodiversidad, y los derivados del uso de agroquímicos, entre otros, han sido atenuados a niveles tolerables e inferiores a los de la mayoría de otros cultivos agrícolas.

5

El uso del etanol de caña de azúcar permite reducir en casi un 90% las emisiones de gases de efecto invernadero, contribuyendo de modo efectivo a mitigar el cambio climático. En las condiciones actuales, por cada millón de metros cúbicos de bioetanol de caña de azúcar mezclado con gasolina, se dejan de liberar a la atmósfera cerca de 1,9 millones de toneladas de CO₂.

6

Las perspectivas de desarrollo tecnológico en la agroindustria del bioetanol de caña de azúcar son promisorias, con posibilidades importantes de aumento de su productividad y desempeño energético (inclusive en la fase agrícola) y de diversificación de sus productos derivados, especialmente a través de las vías de hidrólisis y gasificación, las cuales podrían emplearse para el incremento de la producción de bioetanol y de bioelectricidad. El desarrollo adecuado de programas bioenergéticos depende principalmente de su continua interacción con las fuentes de innovación.

7

La creciente mecanización de la cosecha de la caña de azúcar reduce el trabajo manual; pese a ello, la demanda de mano de obra por unidad de energía producida se ha mantenido constante en comparación con otras fuentes energéticas.

8

La producción del bioetanol de caña de azúcar, tal como se desarrolla en Brasil, afecta poco la producción de alimentos, con un área plantada muy reducida en relación al área cultivada para producir alimentos y a las áreas disponibles para la expansión de las actividades agrícolas.

9

La agroindustria del bioetanol de caña de azúcar se articula con muchos sectores de la economía y fomenta el desarrollo de diversas áreas, como la prestación de servicios, la industria de equipos agrícolas e industriales y la logística. El soporte al desarrollo científico y tecnológico es un elemento importante de esa cadena productiva y es fundamental para asegurar la utilización sostenible de la materia prima y permitir una elevada eficiencia.

10

Las posibilidades para expandir la producción de bioetanol de caña de azúcar son amplias, no sólo en Brasil, sino también en otros países tropicales húmedos, considerando su disponibilidad de tierras no utilizadas o utilizadas en actividades pecuarias de baja productividad.

En efecto, buena parte de las características del bioetanol de caña de azúcar no son suficientemente conocidas aún; por eso es deseable que los decisores públicos y privados, y los formadores de opinión reciban informaciones objetivas, que les permitan asumir posiciones mejor informadas con relación a esta cadena energética. El bioetanol de caña de azúcar puede cumplir un papel relevante en la matriz energética de muchos países, aunque por su poca comprensión hayan cuestionamientos, preconceptos y desinformaciones, que deberán ser superados.

Un aspecto esencial para profundizar la comprensión de las potencialidades y limitaciones de los biocombustibles, es reconocer su importancia en el contexto productivo. Muchos estudios sobre bioetanol han difundido información incorrecta, promoviendo una visión un tanto simple, en la que no se distingue adecuadamente entre las fuentes a partir de las cuales éste se puede producir. Sin embargo, como se trató en el Capítulo 3, la producción de bioetanol de caña es diferente a la producción de etanol a partir de otros cultivos, pues la caña presenta claramente mejores indicadores de sostenibilidad.

Otro ejemplo de la limitada comprensión es el uso del término “biocombustibles de segunda generación” para designar a los biocombustibles producidos por vías aún en desarrollo, especialmente a base de residuos lignocelulósicos, mediante procesos como la hidrólisis enzimática o la gasificación seguida de procesos Fischer-Tropsch, tal como se mostró en el Capítulo 5. En diversos estudios y documentos se sugiere que estos biocombustibles serán los redentores de la viabilidad de la bioenergía (que podrá entonces ser considerada una fuente energética moderna y sostenible). Ello por cuanto serán competitivos económicamente; presentarán una buena relación entre la energía producida y la demandada en su producción; causarán un reducido impacto ambiental, tendrán un buen potencial para mitigar el cambio climático; y no afectarán la producción de alimentos, al utilizar integralmente la materia prima. En rigor, dado que el etanol de caña cumple con la mayoría de esos requisitos, los países en capacidad de producirlo no deberían tener que esperar por esas tecnologías, la mayoría aún en

desarrollo, cuyos costos proyectados, para ser alcanzados dentro de 20 años, son del mismo orden de los costos actuales de la agroindustria cañera en los países tropicales [IEA (2005)]. Es necesario desarrollar nuevas tecnologías para el bioetanol; sin embargo es posible utilizar ya, de manera eficiente, las tecnologías actuales y comercialmente disponibles en el mercado, como la tecnología del bioetanol de caña de azúcar..

La comprensión de los atributos del bioetanol de caña de azúcar tiende a ampliarse y, en algunos foros importantes ya se ha buscado destacar a este biocombustible de los demás, indicando su viabilidad y racionalidad. En este sentido, investigaciones de agencias internacionales son cada vez más claras en reconocer que el fomento a la producción de bioetanol por vías ineficientes y la adopción de barreras a la importación del etanol de caña de azúcar por parte de los países desarrollados han aumentado, en verdad, las distorsiones en los mercados energéticos.

Entre otros, se puede citar un estudio de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), sobre el impacto de los biocombustibles en los mercados agrícolas, en el cual se afirma que *“Reducir tales barreras (incluyendo la creación de normas internacionales para los biocombustibles) no sólo le permitiría a los países en desarrollo vender mejor sus productos, sino también ayudaría a los países importadores a cumplir sus objetivos ambientales implícitos en las políticas nacionales de biocombustible, siempre que los biocombustibles se produzcan en los países exportadores de una forma ambientalmente racional”* [OCDE (2007a)].

También merecen mención el informe anual del Fondo Monetario Internacional, en el cual se busca mostrar cómo las barreras interpuestas a la importación de biocombustibles eficientes son nefastas para todos los países [IMF (2007)], y el informe del Programa ESMAP, del Banco Mundial, que recomienda la apertura del comercio internacional de biocombustibles como forma de ampliar su eficiencia energética y ambiental [ESMAP (2007)].

Del mismo modo, el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), en su Informe de Desarrollo Humano 2007/2008, manifiesta que *“El comercio internacional podría desempeñar un papel mucho mayor en la expansión de los mercados de combustibles alternativos. Brasil es más eficiente que la Unión Europea o los Estados Unidos en la producción de etanol. Además de ello, el etanol de caña de azúcar es más eficiente en la reducción de las emisiones de carbono. El problema es que las importaciones de etanol brasileño están restringidas por las elevadas tarifas de importación. Retirando esas tarifas, se generarían ganancias no sólo para Brasil, sino también para la mitigación de las alteraciones climáticas”* [UNDP (2007)].

El Banco Mundial, en un documento sobre salidas a la crisis en la oferta de alimentos, firmado por su presidente, emite una opinión similar: *“Precisamos que Europa y Estados Unidos reduzcan sus subvenciones y barreras aduaneras que favorecen a los biocombustibles derivados del maíz y semillas oleaginosas. En los Estados Unidos, el uso del maíz para producir bioetanol*

consumió más del 75% del aumento de la producción global de este cereal, en los últimos tres años. Los decisores políticos deben considerar 'válvulas de seguridad' que dificulten estas políticas, cuando los precios son elevados. La elección no tiene que ser comida o combustible. Cortes en las tarifas sobre etanol importado por los mercados norteamericano y europeo incentivarían la producción más eficiente de biocombustibles de caña, que no compiten directamente con la producción alimentaria, y aumentarían las oportunidades para los países más pobres, inclusive en África" [World Bank (2008)].

La formación de mercados globales para el bioetanol y la ampliación de sus beneficios dependen en gran medida de esta correcta comprensión de la realidad se transforme en medidas efectivas.

Directamente relacionados con la formación de los mercados e igualmente importante para el desarrollo de la producción sostenible de los biocombustibles, son los temas de la integración y coordinación de las políticas de fomento, así como la realización de estudios de evaluación de los potenciales productivos, que permitan una clara identificación de los problemas, impactos y ventajas en cada caso. Todo ello con la finalidad de reforzar la capacidad de los decisores y de fomentar la articulación de las políticas comerciales y las de combate al cambio climático. [Best et al. (2008)].

Es importante observar que la agroindustria moderna de la caña de azúcar presenta además grandes posibilidades de diversificación de sus productos y de aumento de las disponibilidades energéticas. Con el uso de las tecnologías en desarrollo o ya en fase piloto, se avanza cada vez más en dirección a las biorrefinerías, complejos productivos capaces de suministrar bioenergía y biomateriales diversos, incluyendo alimentos y plásticos biodegradables. Igualmente, los actuales estudios agronómicos buscan preservar y diversificar la base de germoplasma de la caña de azúcar, a partir de los estudios fundamentales sobre el proceso fotosintético, con interesantes perspectivas de incremento en el desempeño energético y productivo de este vegetal.

Ciertamente queda mucho por hacer y persisten desafíos por superar para expandir los sistemas bioenergéticos, pero los beneficios serán proporcionales, pues un desarrollo energético sostenible es fundamental para consolidar una nueva relación entre naturaleza y sociedad. Desde este punto de vista, la producción y el uso del bioetanol de caña de azúcar ofrece una alternativa concreta para empezar la construcción de una nueva realidad energética, más sostenible, que haga de esta agroindustria la fuerza motriz de deseables transformaciones sociales y económicas. El modelo brasileño, perfeccionado por décadas y con nuevas posibilidades de expansión con mayor productividad y eficiencia, está a la disposición de los países que, por su demanda de combustibles, deseen reducir competitivamente sus emisiones de gases de efecto invernadero y diversificar sus fuentes de suministro energético; o que, por su clima, su suelo y su gente, puedan repetir exitosamente la producción eficiente de biocombustibles, para uso y beneficio de todos.



Anexos

Anexo 1 – Producción de caña e etanol anhidro e hidratado en Brasil

Año	Producción de caña [millón de t]	Producción de alcohol etílico [10 ³ m ³]	Producción de alcohol hidratado [10 ³ m ³]	Producción de alcohol anhidro [10 ³ m ³]
1975	88,92	580	360	220
1976	102,77	642	370	272
1977	120,01	1.388	300	1.088
1978	129,06	2.248	399	1.849
1979	139,27	2.854	527	2.327
1980	146,23	3.676	1.501	2.175
1981	153,78	4.207	2.859	1.348
1982	186,38	5.618	2.091	3.527
1983	216,45	7.951	5.395	2.556
1984	241,39	9.201	7.059	2.142
1985	246,54	11.563	8.419	3.144
1986	238,49	9.983	7.863	2.120
1987	268,58	12.340	10.185	2.155
1988	258,45	11.523	9.837	1.686
1989	252,29	11.809	10.315	1.494
1990	262,60	11.518	10.669	849
1991	260,84	12.862	10.818	2.044
1992	271,43	11.766	9.540	2.226
1993	244,30	11.395	8.869	2.526
1994	292,07	12.513	9.715	2.798
1995	303,56	12.745	9.742	3.003
1996	325,93	14.134	9.701	4.433
1997	337,20	15.494	9.823	5.671
1998	338,97	14.121	8.438	5.683
1999	331,71	12.981	6.807	6.174
2000	325,33	10.700	5.056	5.644
2001	344,28	11.466	4.985	6.481
2002	363,72	12.588	5.548	7.040
2003	389,85	14.470	5.638	8.832
2004	416,26	14.648	6.789	7.859
2005	419,56	16.040	7.832	8.208
2006	457,98	17.764	9.851	7.913

Fuente: ⁽¹⁾ IBGE; ⁽²⁾ BEN 2007.

Anexo 2A – Área plantada con caña en Brasil

Año	Brasil		
	Producción (mil t)	Área cosechada (mil ha)	Rendimiento médio (t/ha)
1990	262.674	4.273	61,5
1991	260.888	4.211	62,0
1992	271.475	4.203	64,6
1993	244.531	3.864	63,3
1994	292.102	4.345	67,2
1995	303.699	4.559	66,6
1996	317.106	4.750	66,8
1997	331.613	4.814	68,9
1998	345.255	4.986	69,2
1999	333.848	4.899	68,1
2000	326.121	4.805	67,9
2001	344.293	4.958	69,4
2002	364.389	5.100	71,4
2003	396.012	5.371	73,7
2004	415.206	5.632	73,7
2005 ¹	455.272	6.172	73,8

Anexo 2B – Área plantada con caña en los principales estados productores

Año	Maiores estados produtores									
	São Paulo		Paraná		Alagoas		Minas Gerais		Pernambuco	
	Producción	Área cosechada	Producción	Área cosechada	Producción	Área cosechada	Producción	Área cosechada	Producción	Área cosechada
1990	137.835	1.812	11.736	159	26.151	559	17.533	298	22.818	467
1991	136.200	1.852	12.219	172	22.214	484	17.583	276	23.505	467
1992	145.500	1.890	13.571	186	22.669	448	17.354	272	25.199	488
1993	148.647	1.896	13.694	190	12.922	323	15.743	261	14.347	363
1994	174.100	2.173	15.946	216	21.740	439	16.212	262	19.259	400
1995	174.960	2.259	20.430	256	21.573	450	16.726	268	20.665	418
1996	192.320	2.493	23.468	285	20.754	432	13.331	247	18.784	401
1997	194.025	2.446	24.564	300	24.850	450	16.262	279	20.765	421
1998	199.783	2.565	26.642	310	28.524	461	16.918	279	19.622	402
1999	197.144	2.555	27.106	338	26.860	451	17.557	280	12.253	323
2000	189.040	2.485	23.192	327	27.798	448	18.706	291	15.167	304
2001	198.932	2.567	27.424	338	28.693	456	18.975	294	15.977	339
2002	212.707	2.661	28.083	359	25.171	438	18.231	278	17.626	348
2003	227.981	2.818	31.926	374	27.221	416	20.787	303	18.522	359
2004	239.528	2.952	32.643	400	26.284	423	24.332	335	19.015	364
2005 ¹	266.071	3.285	34.882	437	23.991	397	31.587	424	18.832	370

Fonte: Produção, área e rendimento médio: IBGE – Produção Agrícola Municipal (PAM – 1990 a 2004) y Levantamiento Sistemático de la Producción Agrícola (LSPA – julio/2006). Elaboración: Secretaria de Política Agrícola – Mapa (Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento). Anuario, 2005.

Nota: ¹ Estimativa.

Anexo 3 – Precio de etanol pagado al productor en São Paulo

Año (semestre)	Alcohol anhidro (R\$/litro)	Alcohol hidratado (R\$/litro)
2000 (2)	0,668678	0,749999
2001 (1)	0,629092	0,716373
2001 (2)	0,623336	0,706785
2002 (1)	0,584636	0,503122
2002 (2)	0,6228	0,543285
2003 (1)	0,913213	0,783303
2003 (2)	0,653644	0,559895
2004 (1)	0,521573	0,454482
2004 (2)	0,832212	0,713184
2005 (1)	0,803179	0,70349
2005 (2)	0,883684	0,774705
2006 (1)	1,070215	0,998262
2006 (2)	0,908019	0,795583
2007 (1)	0,850049	0,763721
2007 (2)	0,719413	0,634066

Fuente: Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (Cepea). <<http://www.cepea.esalq.usp.br/alcool/>>.

Nota: Em junho de 2003, los Indicadores de Alcohol Cepea/Esalq pasaron a utilizar el CDI (Certificado de Depósito Interbancario) para el descuento de las negociaciones a prazo y no más la NPR. A partir de la semana del 6 a 10 de mayo de 2002, los indicadores semanales de alcohol anhidro y de alcohol hidratado combustibles Cepea/Esalq pasaron a ser calculados sin ningun impuesto (ICMS, PIS/Cofins o Cide).





Referencias

- ABIOVE. *Estatísticas do Complexo da Soja*. Associação Brasileira das Indústrias de Óleo Vegetal. Disponible en: www.abiove.com.br. Acceso en: marzo de 2008.
- ABRANTES, R. et al. "Caracterização das emissões de aldeídos de veículos do ciclo diesel". *Revista de Saúde Pública*, São Paulo, v. 39 (3), 2002.
- ADEN, A. et al. *Lignocellulosic biomass to ethanol process design and economics utilizing co-current dilute acid prehydrolysis and enzymatic hydrolysis for corn stover*. Golden, Colorado: National Renewable Energy Laboratory, 2002 (Technical Report NREL TP-510-32438).
- AEROÁLCOOL. *Vantagens do uso do álcool em motores aeronáuticos*. Disponible en: <http://www.aeroalcool.com.br/vantagens.htm>. Acceso en: abril de 2008.
- AGÊNCIA FAPESP. *Notícias sobre etanol*. Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp). Disponible en: <http://www.agencia.fapesp.br/>. Acceso en: abril de 2008.
- AKIYAMA, M. et al. "Environmental life cycle comparison of polyhydroxyalkanoates produced from renewable carbon resources by bacterial fermentation". *Polymer Degradation and Stability*, v. 80, 2003.
- ALEXANDER, M. *Ethanol Africa: clean maize fuel*. Sustainable Development, 2005. Disponible en: <http://www.southafrica.info/about/sustainable/ethanol-120905.htm>. Acceso en: junio de 2008.
- ALMEIDA, E. F. et al. *The performance of Brazilian biofuels: an economic, environmental and social analysis*. Rio de Janeiro: Instituto de Economía, Universidad Federal de Rio de Janeiro, 2007.
- ALVES, F. "Por que morrem os cortadores de cana?". *Saúde e Sociedade*, São Paulo, v. 15 (3), 2006.
- AMYRIS. "Amyris and Crystalsev join to launch innovative renewable diesel from sugarcane by 2010". *Amyris Press Release*, abr. 2008.
- ANDERSSON, P. & VICTORIN, K. *Inhalation of ethanol: literature survey and risk assessment*. Estocolmo: Institutet for Miljomedicin (Institute of Environmental Medicine), Karolinska Institute, 1996 (IMM Rapport 3/96).
- ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Banco de Informações de Geração*. Disponible en: <http://www.aneel.gov.br>. Acceso en: marzo de 2008.
- ANFAVEA – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES. *Anuario Estatístico da Indústria Automobilística Brasileira*. São Paulo: Anfavea, 2008.

ANP – AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. *Preços dos combustíveis*. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/index.asp>. Acesso em: dezembro de 2007.

_____. *Qualidade dos combustíveis*. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/index.asp>. Acesso em: fevereiro de 2008.

ANTONIL, A. J. *Cultura e opulência do Brasil*. Belo Horizonte: Itatiaia, 1982.

APACE RESEARCH. *Intensive field trial of ethanol/petrol blends in vehicles*. Apace Research Ltd, EDRC Project 211, Australia, 1998.

API – AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. *Alcohols and ethers, a technical assessment of their application as fuel and fuel components*. Washington: American Petroleum Institute, 1998 (API Publication 4.261).

_____. *Shipping ethanol through pipelines*. American Petroleum Institute. Disponível em: <http://www.api.org/aboutoilgas/sectors/pipeline/>. Acesso em: novembro de 2007.

APLA – ASOCIACIÓN PETROQUÍMICA Y QUÍMICA LATINOAMERICANA. *Álcool é solução para indústria química*. Asociación Petroquímica y Química Latinoamericana. Disponível em: <http://www.apla.com.ar/petroquimica2/mostrar.php?&id=3679>. Acesso em: junho de 2006.

ARRIGONI, E. D. B. & ALMEIDA, L. C. “Defensivos (pesticidas e outros)”. In: MACEDO, I. C. (org.). *A energia da cana-de-açúcar: doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e a sua sustentabilidade*. São Paulo: Unica, 2005.

ASSOCANA – ASSOCIAÇÃO RURAL DOS FORNECEDORES E PLANTADORES DE CANA DA MÉDIA SOROCABANA. *Custo médio operacional da lavoura da cana-de-açúcar*. Assis: Assocana, 2008.

AUTOALLIANCE. *Worldwide Fuel Chart*. 4ª ed. Ecea, Alliance, EMA, Jama, sep. 2006.

BABU, S. P. *Observations on the current status of biomass gasification*. International Energy Agency (IEA) Task 33: Thermal gasification of Biomass, 2005.

BABU, S. P. & HOFBAUER, H. “Status and prospects of biomass gasification”. *Science in Thermal and Chemical Biomass Conversion Conference (STCBC)*, ago. 2004.

BALAJI, R. *Oil cos in a bind gasohol supply*. Calcutá: Business Line (The Hindu Group), 2002.

BALSADI, O. V. “Mercado de trabalho assalariado na cultura da cana-de-açúcar no Brasil no período 1992-2004”. *Informações Econômicas*, São Paulo, v. 37, n. 2, feb. 2007.

BAUMOL, W. J. “Contestable markets: an uprising in the theory of industry structure”. *American Economic Review*, v. 72, 1982.

- BERNDES, G. et al. "The contribution of biomass in the future global energy supply: a review of 17 studies". *Biomass and Bioenergy*, v. 25 (1), 2003.
- BERTELLI, L. G. "A verdadeira história do Proálcool – Programa Nacional do Álcool". *O Estado de S. Paulo*, 30.10.2007.
- BERTONCINI, E. I. "Geração de resíduos da indústria da cana-de-açúcar". *Workshop: Aspectos Ambientais da Cadeia do Etanol de Cana-de-Açúcar*. Proyecto: Diretrizes de Políticas Públicas para a Agroindústria Canavieira do Estado de São Paulo, São Paulo, 2008.
- BEST. *Bioethanol for Sustainable Transport*. Disponible en: <http://www.best-europe.org/>. Acceso en: marzo de 2008.
- BEST, G. et al. *A sustainable biofuels consensus*. Bellagio: Rockefeller Foundation, Bellagio Center, abril 2008.
- BFS/FAO. "Second FAO Technical Consultation on Bioenergy and Food Security". *Summary Proceedings*, Roma, feb. 2008.
- BIAS – BAYLOR INSTITUTE FOR AIR SCIENCE. *Development of renewable aviation fuels*. Baylor Institute for Air Science, Baylor University. Disponible en: <http://www.baylor.edu/bias>. Acceso en: septiembre de 2006.
- BIOCYCLE. Disponible en: <http://www.biocycle.com.br>. Acceso en: marzo de 2008.
- BLANCO-CANQUI, H. & LAL, R. "Soil and crop response to harvesting corn residues for biofuel production". *Geoderma*, v. 141, 2007.
- BNDES. *BNDES aprova financiamento de R\$ 1,5 milhão para apoio a pesquisa de inovação em etanol*. Disponible en: http://www.bndes.gov.br/noticias/2007/not194_07.asp. Acceso en: diciembre de 2007.
- BRANCO, G. M. "Motores diesel: ecológicos ou poluidores?". *ECOinforme*, sep. 2004.
- BRASIL. *Decreto 19.717, Obrigatoriedade da adição de álcool à gasolina de procedência estrangeira*. Rio de Janeiro, 20.2.1931.
- BRUSSTAR, M. & BAKENHUS, M. *Economical, high efficiency engines technologies for alcohol fuels*. US Environmental Protection Agency, 2005.
- BURNQUIST, W. L. & LANDELL, M. "O melhoramento genético convencional e a disponibilidade de variedades". In: MACEDO, I. C. (org.). *A energia da cana-de-açúcar: doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e a sua sustentabilidade*. São Paulo: Unica, 2005.

- CALVO, Guillermo. *Exploding commodity prices, lax monetary policy, and sovereign wealth fund*. VOX, 20 June, 2008.
- CANAVIALIS. *Melhoramento genético*. Disponible en: <http://www.canavialis.com.br/>. Acceso en: marzo de 2008.
- CARBOGÁS. *Produção de CO₂ de grau alimentar*. Disponible en: <http://www.carbogas.ind.br>. Acceso en: marzo de 2008.
- CARVALHO, E. *Perspectivas da agroenergia*. São Paulo: Unica, 2007.
- CARVALHO, P. A. "Informações pessoais". Rio de Janeiro: Superintendencia de Calidad de Productos, Agencia Nacional del Petróleo, 2003.
- CASTRO, M. H. M & SCHWARTZMAN, S. *Tecnologia para a indústria: a história do Instituto Nacional de Tecnologia [1981]*. Disponible en: <http://www.schwartzman.org.br/simon/>. Acceso en: abril de 2008.
- CAVALCANTI, E. *Importância da qualidade do álcool etílico combustível*. Apresentado no "I Seminário sobre Tecnologia para Pequena Produção de Alcool", Confederación Nacional de Agricultura, Brasília, 2007.
- CAVALCANTI, F. C. B. *Transformando competências em casos de sucesso: a Oxiteno e o desenvolvimento de tecnologia nacional em catalisadores*. Anales del "XII Congreso Brasileño de Catálisis", Sociedad Brasileña de Catálisis, 2005.
- CBD – CONVENTION ON BIOLOGICAL DIVERSITY. *Recommendations*. Convention on Biological Diversity. Disponible en: <http://www.cbd.int/recommendations/?rec=XII/7>. Acceso en: abril de 2008.
- CDM – CLEAN DEVELOPMENT MECHANISM. United Nations Framework Convention on Climate Change. Disponible en: <http://cdm.unfccc.int/index.html>. Acceso en: abril de 2008.
- CEPAL – COMISIÓN ECONÓMICA PARA AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE. *Fuentes Renovables de energía en América Latina y el Caribe: dos años después de la Conferencia de Bonn*. Santiago de Chile: Proyecto Cepal/GTZ, Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 2007.
- CEPEA – CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA. *Preços de etanol anidro e hidratado*. Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada. Disponible en: <http://cepea.usp.br>. Acceso en: abril de 2008.
- CERRI, D. G. P. *Agricultura de precisão em cana-de-açúcar: instrumentação de uma colhedora, mapeamento da produtividade e de atributos do solo*. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, 2005 (Tesis de Doctorado).

- CETESB – COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. *Redução da queima da palha da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo*. São Paulo: Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, mar. 2008.
- CGEE – CENTRO DE GESTÃO DE ESTUDOS ESTRATÉGICOS. *Estudo sobre as possibilidades e impactos da produção de grandes quantidades de etanol visando à substituição parcial de gasolina no mundo – Fase 1*. Campinas: Nipe/Unicamp y Centro de Gestão de Estudos Estratégicos, 2005.
- _____. *Estudo prospectivo de solo, clima e impacto ambiental para o cultivo da cana-de-açúcar e análise técnica/econômica para o uso do etanol como combustível – Etanol Fase 3*. Campinas: Nipe/Unicamp y Centro de Gestão de Estudos Estratégicos, 2007a.
- _____. *Estudo sobre as possibilidades e impactos da produção de grandes quantidades de etanol visando à substituição parcial de gasolina no mundo – Fase 2*. Campinas: Nipe/Unicamp y Centro de Gestão de Estudos Estratégicos, 2007b.
- _____. Informações aos autores. Campinas: Centro de Gestão de Estudos Estratégicos, 2008.
- CHEVRONTEXACO CORP. *Motor Gasolines/ Oxygenated Gasoline*. Disponible en: <http://www.chevron.com/prodserv/fuels/bulletin/motorgas/ch4.shtml>. Acceso en: julio de 2006.
- CMAI – CHEMICAL MARKET ASSOCIATED INC. *Petrochemical demand growth tracks economic growth*. Chemical Market Associated Inc., 2005.
- CNPAB. *Fixação biológica de nitrogênio em plantas não leguminosas*. Embrapa Agrobiologia. Disponible en: <http://www.cnpab.embrapa.br/pesquisas/fbnnl.html>. Acceso en: abril de 2008.
- COELHO, S. T. et al. *A expansão da cultura canavieira no Estado de São Paulo*. Apresentado no “VI Congresso Brasileiro de Planejamento Energético”, Salvador, mayo de 2008.
- CONCAWE. *Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context*. Concawe, Eucar, European Commission, Versión 2007c, marzo de 2007. Disponible en: <http://ies.jrc.ec.europa.eu/WTW>. Acceso en: mayo de 2008.
- CONSONNI, S. & LARSON, E. D. “Biomass-gasifier/aeroderivative gas turbine combined cycles: Part A – Technologies and performance modeling”. *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, v. 118, 1996a.
- _____. “Biomass-gasifier/aeroderivative gas turbine combined cycles: Part B – Performance calculations and economic assessment”. *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, v. 118, 1996b.

- CORTEZ, L. A. B. *A expansão da produção de álcool como programa de desenvolvimento nacional*. Apresentado no âmbito do “Projeto Etanol”, Brasília, CGEE/Nipe, 2007.
- CRESESB/UFPE/CHESF. *Atlas solarimétrico do Brasil*. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (Cresesb), Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) y Companhia Hidroelétrica do São Francisco (Chesf). Recife: UFPE, 2000.
- CTC – CENTRO DE TECNOLOGIA COPERSUCAR. *Diagrama de fases água/gasolina/etanol*. Piracicaba: Centro de Tecnología Copersucar (actualmente Centro de Tecnología Canaveira), 1998.
- _____. *Síntese do controle mútuo agroindustrial*. Piracicaba: Centro de Tecnología Canaveira, 2005.
- _____. *Projetos e Pesquisas*. Centro de Tecnología Canaveira. Disponible en: <http://www.ctc.com.br/>. Acceso en: abril de 2008.
- CUNHA, F. *A logística atual de transporte das distribuidoras e a infra-estrutura para a exportação de álcool*. Petrobras Distribuidora, ago. 2003 (presentación en Power Point).
- DAI, D. et al. “Energy efficiency and potentials of cassava fuel ethanol in Guangxi region of China”. *Energy Conversion and Management*, v. 47, 2006.
- DEDINI. *DHR Dedini Hidrólise Rápida*. Dedini Indústrias de Base. Disponible en: <http://www.dedini.com.br/pt/pdf/dhr.pdf>. Acceso en: marzo de 2008.
- DEMEYER, A. et al. *La conversion bioenergetique du rayonnement solaire et les biotechnologies*. Paris: Technique et Documentation, 1985.
- DIAS LEITE, A. *A Energia do Brasil*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.
- DIPARDO, J. *Outlook for biomass ethanol production and demand*. Washington: Energy Information Administration, Department of Energy, 2000.
- DOE – DEPARTMENT OF ENERGY. *Breaking the biological barriers to cellulosic ethanol: a joint research agenda*, Report DOE/SC-0095, Office of Science and Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Department of Energy. Disponible en: <http://www.doegenomes-tolife.org/biofuels/>. Acceso en: junio de 2006.
- DOE/USDA. *Biomass as feedstock for a bioenergy and bioproducts industry: the technical feasibility of a billion-ton annual supply*. Washington: Department of Energy, US Department of Agriculture, 2005.

- DONZELLI, J. L. "Uso de fertilizantes na produção de cana-de-açúcar no Brasil". In: MACEDO, I. C. (org.). *A energia da cana-de-açúcar: doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e a sua sustentabilidade*. São Paulo: Unica, 2005a.
- _____. "Erosão na cultura da cana-de-açúcar: situação e perspectivas". In: MACEDO, I. C. (org.). *A energia da cana-de-açúcar: doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e a sua sustentabilidade*. São Paulo: Unica, 2005b.
- DRÖSCHER, M. *Kunststoffe: Werkstoffmärkte und Prognosen*. Kongress Zukunft der Werkstoff, Oberhausen, Fraunhofer Institut, sep. 2006.
- DUPONT. *BioButanol*. Disponible en: http://www2.dupont.com/Biofuels/en_US/index.html. Acceso en: mayo de 2008.
- EBAMM. *ERG Biofuels Analysis Meta-Model*. Release 1.0, Energy and Resources Group, University of California, Berkeley, 2005.
- ECOINVEST. Informações aos autores. Empresa de investimentos e desenvolvimento de projetos MDL, abr. 2008.
- EIA – ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. *Petroleum Statistics*. Energy Information Administration, Department of Energy. Disponible en: http://www.eia.doe.gov/oil_gas/petroleum/info_glance/petroleum.html. Acceso en: marzo de 2008.
- EL SAYED, M. A. et al. *Production of ethanol from sugar beet (Appendix Q)*. Carbon and Energy Balance for a Range of Biofuels Options, DTI Project B/B6/00784, Londres, 2005.
- ELIA NETO, A. "Captação e uso de água no processamento da cana-de-açúcar". In: MACEDO, I. C. (org.). *A energia da cana-de-açúcar: doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e a sua sustentabilidade*. São Paulo: Unica, 2005.
- _____. *Meio ambiente e setor sucroalcooleiro*. "Canasul 2007, I Congresso da Cadeia Produtiva da Cana-de-Açúcar em Mato Grosso do Sul", Campo Grande, 2007.
- EPFL – ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE. *The roundtable on sustainable biofuels: ensuring biofuels deliver on their promise of sustainability*. Energy Center, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2008. Disponible en: <http://cgse.epfl.ch/page65660.html>. Acceso en: abril de 2008.
- ERS – ECONOMIC RESEARCH SERVICE. *Global agricultural supply and demand: factors contributing to the recent increase in food commodity prices*. Washington: Economic Research Service, Department of Agriculture, 2008 (Report WRS-0801).

ESMAP – ENERGY SECTOR MANAGEMENT ASSISTANCE PROGRAMME. *Potential for biofuels for transport in developing countries*. Washington: Energy Sector Management Assistance Programme, United Nations Development Program/World Bank, 2005.

_____. *Considering trade policies for liquid biofuels*. Washington: Energy Sector Management Assistance Programme, United Nations Development Program/World Bank, 2007.

ETHANOLBUS. *Ethanol buses in Sweden*. Disponible en: <http://www.ethanolbus.com/>. Acceso en: marzo de 2008.

EUROPEAN COMMISSION. *Council Regulation (EC) n° 980/2005*. Bruselas: European Commission, jun. 2005.

EXAME. "A nova fronteira do etanol". *Portal Exame*, 20.9.2007. Disponible en: <http://portalexame.abril.com.br/revista/exame/edicoes/0902/economia/m0138746.html>. Acceso en: junio de 2008.

F. O. Licht. *World Ethanol Markets: Outlook to 2015*. Kent: F. O. Licht, 2006.

_____. *World Sugar Yearbook 2007*. Kent: F. O. Licht, 2007.

_____. "Cogeneration may be the next big story for the Brazilian sugar industry". *World Ethanol & Biofuels Report*, v. 6 (13), mar. 2008 (2008a).

_____. "Ghana: Sekab to source ethanol from Northern Sugar in 2010-20". *World Ethanol & Biofuels Report*, v. 6 (17), mayo 2008 (2008b).

FAAIJ, A. P. C. et al. *Long term perspectives of Biomass Integrated Gasification/Combined Cycle Technology: costs and electrical efficiency*. Utrecht: Novem/Department. of Science, Technology and Society, Utrecht University, 1998.

FAAIJ, André & DOMAC, Julije. "Emerging international bio-energy markets and opportunities for socio-economic development. *Energy for Sustainable Development*, v. X, n. 1. p. 7-19, 2006.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. *Climdata Rainfall Database*. Roma: United Nations Food and Agriculture Organization, Sustainable Development Department, Agrometeorology Group, 1997.

_____. *Wood Energy Information System (WEIS)*. Preliminary report. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations, Forestry Department, 2001.

- _____. "World agriculture: towards 2015/2030". In: BRUINSMA, J. (ed.). *An FAO perspective*. Londres: Food and Agriculture Organization of the United Nations, Earthscan Publications, 2003.
- _____. *Global Forest Resources Assessment 2005*. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2006.
- _____. *Sugar: global market analysis*. Food Outlook. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2007a.
- _____. *What is food security*. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2007b.
- _____. *Soaring food prices: facts, perspectives, impacts and actions required*. Document HLC/08/INF/1, abr. 2008, presented at the "High-Level Conference on World Food Security: The Challenge of Climate Change and Bioenergy", Rome, 3- 5 June.
- FAOSTAT. *Sugar cane production*. Disponible en: <http://faostat.fao.org>. Acceso en: marzo de 2008 (2008a).
- _____. *Food commodities prices*. Disponible en: <http://faostat.fao.org>. Acceso en: abril de 2008 (2008b).
- _____. *Bioenergy and Food Security Project (BEFS)*. Disponible en: <http://www.fao.org/nr/ben/befs/>. Acceso en: mayo de 2008 (2008c).
- FAPESP. *Brazil world leader in sugarcane and ethanol knowledge and technology (Fapesp's contribution)*. São Paulo: The State of São Paulo Research Foundation, 2007.
- FARGIONE, J. et al. "Land clearing and the biofuel carbon debt". *Science*, v. 319 (5.867), 2008.
- FARRELL, A. E. et al. "Ethanol can contribute to energy and environmental goals". *Science*, v. 311 (27), 2006.
- FAURÈS, J. M. *Competition for natural resources: the case of water*. "II FAO Consultation on Bioenergy and Food Security", FAO, Roma, 2008.
- FBDS – FUNDAÇÃO BRASILEIRA PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. *Liquid biofuels for transportation in Brazil*. Projeto GTZ/FBDS. Rio de Janeiro: Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável, 2005.
- FERNANDES, A. C. *Cálculos na agroindústria da cana-de-açúcar*. 2ª ed. Piracicaba: Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil, 2003.

FRANKEL, Jeffrey. *The effect of monetary policy on real commodity prices*. Cambridge, MA: National Bureau of Economic Research, 2006 (Working Paper, 12.713).

_____. *An explanation for soaring commodity prices*. VOX, 25 de marzo (2008a).

_____. *Monetary policy and commodity prices*. VOX, 29 de mayo (2008b).

FRIE, C. et al. *White paper: sustainable biofuels program: the need for biofuel certification/labelling*. Lausanne: École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2006.

FUREY, R. L. *Volatility characteristics of gasoline-alcohol and gasoline-ether fuel blends*. Society of Automotive Engineers, 1985 (SAE Paper 852116).

FURTADO, A. T. et al. *O sistema de inovação da agroindústria canavieira brasileira*. Apresentado no "VI Congresso Brasileiro de Planejamento Energético", Salvador, mayo de 2008.

GALBE, M. & ZACCHI, G. "A review of the production of ethanol from softwood". *Applied Microbiology and Biotechnology*, v. 59, 2002.

GAZETA MERCANTIL. "Etanol vai ter padrão mundial em 2008", *Gazeta Mercantil*, São Paulo, 7.2.2008.

GNANSOUNOU, E. et al. *The Context of the Southern Africa Development Community (SADC). Sustainable Liquid Biofuels for Transport*, Energy Center, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, nov. 2007. Disponible en: http://lasen.epfl.ch/webdav/site/lasen/shared/Sustainable_Liquid_Biofuels_for_Transport-SADC.pdf. Acceso en: junio de 2008.

GAVA, G. J. C. et al. "Urea and sugarcane straw nitrogen balance in a soil-sugarcane crop system". *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 40 (7), 2005.

GBEP. *A review of the current state of bioenergy development in G8 + 5 countries*. Disponible en: http://www.globalbioenergy.org/fileadmin/user_upload/gbep/docs/2007. Acceso en: abril de 2008.

GENENCOR INTERNATIONAL INC. "Genencor celebrates major progress in the conversion of biomass to ethanol ". *Focus on Catalysts*, dic. 2004.

GLOBAL BIOFUELS CENTER. Informações aos autores por KLEIN, T. [directora ejecutiva], 2008. Disponible en: <http://www.ifqcbiofuels.org/>.

GOLDEMBERG, J. *Brazilian Energy Initiative*. Apresentado no "World Summit on Sustainable Development", Johannesburgo, sep. 2002.

- GOLDEMBERG, J. & MACEDO, I. C. "The Brazilian Alcohol Program – An overview". *Energy for Sustainable Development*, v. 1 (1), 1994.
- GOLDEMBERG, J. et al. "The sustainability of ethanol production from sugarcane". *Energy Policy*, v. 36 (4), 2008.
- GOLDEMBERG, J. et al. "Ethanol learning curve: the Brazilian experience". *Biomass and Bioenergy*, v. 26 (3), 2004.
- GOLDEMBERG, J. et al. "The Brazilian Fuel-Alcohol Program". In: JOHANSSON, T. B. et al. (eds.). *Renewable energy: sources for fuels and electricity*. Washington: Island Press, 1993.
- GOMES, M. G. F. M. "Experiência da Petrobras no transporte de etanol carburante". *Revista Opiniões*, número especial sobre logística en el sector sucroalcoholero, abr.-jun. 2008.
- GOODLAND, R. et al. (eds.). *Population, technology, and lifestyle: the transition to sustainability*. Nova York: Island Press, 1992.
- GPC – GLOBAL PETROLEUM CLUB. *Oil from algae*. Global Petroleum Club. Disponible en: <http://www.globalpetroleumclub.com>. Acceso en: febrero de 2008.
- GRABOWSKI, P. *Biomass thermochemical conversion: OBP efforts*. Washington: Office of Biomass Program, 2004.
- GRAF, A. & KOEHLER, T. *Oregon cellulose-ethanol study: An evaluation of the potential for ethanol production in Oregon using cellulose-based feedstocks*. Salem: Oregon Office of Energy, jun. 2000.
- GRAY, K. A. et al. "Bioethanol". *Current Opinion in Chemical Biology*, v. 10, 2006.
- GUILHOTO, J. J. M. "Geração de emprego nos setores produtores de cana-de-açúcar, açúcar e álcool no Brasil e suas macro-regiões". Relatório *Cenários para o setor de Açúcar e Álcool*. São Paulo: MB Associados e Fipe, 2001.
- GUIMARÃES, M. et al. *Energia da biomassa – Alavanca de uma nova política industrial*. Brasília: Secretaria de Tecnologia Industrial, Ministério da Indústria e Comércio, 1986.
- HALL, D. O. et al. "Visão geral de energia e biomassa". In: ROSILLO-CALLE, F. et al. (orgs.). *Uso da biomassa para produção de energia na indústria brasileira*. Campinas: Unicamp, 2005.
- HALL, D. O. & RAO, K. *Photosynthesis*. 6ª. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- HAMELINCK, C. N. *Outlook for advanced biofuels*. Utrecht: Universiteit Utrecht, 2004 (PhD Thesis).

- HAMELINCK, C. N. et al. *Production of FT transportation fuels from biomass: process analysis and optimisation, and development potential*. Utrecht: Copernicus Institute, Utrecht University, 2003 (Report NWS-E-2003-08).
- HAMELINCK, C. N. et al. *Future prospects for the production of methanol and hydrogen from biomass*. Utrecht: Science, Technology and Society/Utrecht University, 2001.
- HAMELINCK, C. N. et al. "Ethanol from lignocellulosic biomass: techno-economic performance in short, middle and long-term". *Biomass and Bioenergy*, v. 28 (4), 2005.
- HASEGAWA, M. & FURTADO, A. T. "Avaliação dos impactos de programas de P&D". (Um estudo do ProCana). *Inovação Uniemp*, Campinas, v. 2 (3), 2006.
- HASSUANI, S. J. et al. *Biomass power generation: sugar cane bagasse and trash*. Piracicaba: PNUD-CTC, Serie: Caminhos para Sustentabilidade, 2005.
- HECK, J. *Cogeração de eletricidade a partir do bagaço de cana*. Cia. Açucareira Vale do Rosário, 2006.
- HORTA NOGUEIRA, L. A. *Perspectivas de un programa de biocombustibles en América Central*. Cidade do México: Proyecto Cepal/GTZ Uso Sustentable de Hidrocarburos, Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 2004.
- _____. *Costos y precios para etanol en Centro América*. Ciudad de México: Proyecto Cepal/Gobierno de Italia, Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 2006a.
- _____. *Ethanol as fuel in Brazil (small distilleries and use of ethanol as cooking fuel)*. Belo Horizonte: Projeto Gaia, Winrock Foundation e Banco do Povo, 2006b.
- _____. *Biocombustíveis na América Latina: situação atual e perspectivas*. São Paulo: CADERNOS do Memorial da América Latina, 2007.
- _____. *Sustainable woodfuel production in Brazil*. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2008.
- HOWELER, R. *Cassava in Asia: present situation and its future potential in agro-industry*. Bangkok: CIAT Cassava Office for Asia, Department of Agriculture, 2003.
- IBAMA – INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. *Proconve – Programa de Controle das Emissões Veiculares*. Brasília: Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, 2006. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/proconve>. Acesso em: novembro de 2006.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Pesquisa Nacional por Amostragem de Domicílios 2004, microdados Brasil*. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2005 (CD-ROM, 2005).

_____. *Censo Agropecuário 2006* (Dados preliminares). Disponible en: <http://www1.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/>. Acceso en: abril de 2008.

ICRISAT – INTERNATIONAL CROPS RESEARCH INSTITUTE FOR THE SEMI-ARID TROPICS. *Icrisat develops sweet sorghum for ethanol production*. International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics, 2004. Disponible en: <http://www.icrisat.org/media/2004/media13.htm>. Acceso en: mayo de 2006.

IDEA – INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO AGROINDUSTRIAL. *Digital Usinas – Cadastro Nacional de Unidades Sucoalcooleiras*. Ribeirão Preto: Instituto de Desenvolvimento Agroindustrial, 2007.

_____. “X Seminário de Mecanização e Produção de Cana-de-Açúcar”. Instituto de Desenvolvimento Agroindustrial, Ribeirão Preto, 2008.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Biofuels for transport: an international perspective*. Paris: International Energy Agency, 2004.

_____. *World Energy Outlook*. Paris: International Energy Agency, 2007.

_____. *Sustainable international bioenergy trade*. International Energy Agency. Disponible en: www.fairtrade.org. Acceso en: marzo de 2008.

IEA BIOENERGY. *Potential contribution of bioenergy to the world's future energy demand*. Paris: International Energy Agency, 2007 (IEA Bioenergy Task 40).

IEL/SEBRAE. *O novo ciclo da cana: estudo sobre a competitividade do sistema agroindustrial da cana-de-açúcar e prospecção de novos empreendimentos*. Brasília: Instituto Euvaldo Lodi/Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas, 2005.

IFPRI – INTERNATIONAL FOOD POLICY RESEARCH INSTITUTE. *A 2020 vision for food, agriculture, and the environment, International Food Policy Research Institute*. Washington: International Food Policy Research Institute, 2006.

IIED. *The multilateral trade and investment context for biofuels: Issues and challenges*. Sophia Murphy Institute for Agriculture and Trade Policy, dic. 2007. Disponible en: <http://www.iatp.org/>. Acceso en: mayo de 2008.

- ILLOVO. *International Sugar Statistics*. Illovo Sugar, 2008. Disponible en <http://www.illovosugar.com/worldofsugar>. Acceso en: marzo de 2008.
- IMF – INTERNATIONAL MONETARY FUND. “Making the most of biofuels”. *World Economic Outlook*. Washington: International Monetary Fund, 2007.
- INDIA INFOLINE. *Sugar*. Disponible en: <http://www.indiainfoline.com/sect/suin/ch07.html>. Acceso en: marzo de 2008.
- INOVAÇÃO UNICAMP. “Oxiteno apresenta projeto ao BNDES para construir biorrefinaria; quer obter etanol a baixo custo para fabricar produtos químicos” [2006]. Disponible en: http://www.inovacao.unicamp.br/report/news_oxiteno060807.shtml. Acceso en: marzo de 2008.
- _____. “Diretor-executivo da Ridesa conta a história e o que faz a maior rede de pesquisa universitária em melhoramento genético da cana-de-açúcar” [2007]. Disponible en: <http://www.inovacao.unicamp.br/etanol/report/entre-marcosridesa070522.php>. Acceso en: diciembre de 2007.
- _____. “Empresas asiáticas investem US\$ 170 mi na produção de lisina: componente de ração animal multiplica por sete valor do açúcar” [2008]. Disponible en: <http://www.inovacao.unicamp.br/report/news-lisina.shtml>. Acceso en: marzo de 2008.
- INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. *Projeto PRODES – Monitoramento da Floresta Amazônica Brasileira por Satélite*. Estimativas anuais desde 1988 até 2007, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2008. Disponible en: <http://www.obt.inpe.br/prodes/>. Acceso en: abril de 2008.
- INSTITUTO FLORESTAL. *Situação atual dos remanescentes da cobertura vegetal natural do Estado de São Paulo*. São Paulo: Secretaria do Medio Ambiente do Estado de São Paulo, 2004.
- IOWA CORN. “How our corn crop was used in 2005-06”. Disponible en: <http://www.iowacorn.org>. Acceso en: marzo de 2008.
- IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *Climate Change 2007 – Synthesis Report*. Ginebra: Intergovernmental Panel on Climate Change, WMO, Unep, 2008.
- ISA – INSTITUTO SOCIOAMBIENTAL. *Desmatamento na Amazônia e agronegócio*. Instituto Socioambiental, 2008. Disponible en: <http://www.socioambiental.org/nsa/detalhe?id=2357>. Acceso en: mayo de 2008.
- JANICK, J. *Sugarcane*. Tropical Horticulture, Purdue University. Disponible en: http://www.hort.purdue.edu/newcrop/tropical/lecture_21/sugarcane_R.html. Acceso en: diciembre de 2007.

- JANK, M. *Outlook for Brazilian ethanol technologies*. São Paulo: Unica, 2007.
- JANSSENS, M. J. J. et al. *The role of photosynthesis and bio-productivity on bioenergy yields*. Bonn: University of Bonn, Institute of Crop Science and Resource Conservation, 2007.
- JIN, H. et al. *Performance and cost analysis of future, commercially-mature gasification-based electric power generation from switchgrass*. Draft Manuscript to Biomass and Bioenergy, nov. 2006.
- JORNAL DO COMMERCIO. "Coperbo: uma idéia feliz e adequada ao seu tempo". Disponible en: http://www2.uol.com.br/JC/_1999/80anos/80d_29.htm. Acceso en: diciembre de 1999.
- JORNALCANA. "Alltech reúne 400 produtores do Brasil e do mundo e anuncia início de atividades de fábrica de U\$ 25 milhões no Paraná". *JornalCana*, 8.9.2005.
- JOSEPH JR., H. *Ethanol fuel: vehicular application technology*. São Paulo: Anfavea, Energy and Environment Division, 2005.
- _____. *Flex fuel technology in Brazil*. São Paulo: Anfavea, Energy and Environment Division, 2007.
- JUERGENS, I. "Can biofuels make a significant contribution to sustainable energy supply?". *Biofuels – Global Issues*, The Foundation for Science and Technology, mayo 2007.
- JUNGINGER, M. et al. "A growing role: opportunities, challenges and pitfalls of the biofuels trade". *Renewable Energy World*, 2007.
- KARLSSON, M. *Integrated forest biorefinery*. "Latin America European Union Biofuels Research Workshop", Campinas, 2007.
- KEESE, W. J. *Transition from methyl tertiary-butyl ether to ethanol in California*. Washington: (Chairman of California Energy Commission), Congress of the United States, House of Representatives, Committee on Government Reform, Subcommittee on Energy Policy, Natural Resources and Regulatory Affairs, jul. 2003.
- KOISUMI, T. *Biofuel policies in Asia*. "FAO Expert Meetings 5 and 6", Roma, feb. 2008.
- LAMONICA, H. M. *Potencial de geração de excedentes de energia elétrica a partir da biodigestão da vinhaça*. Apresentado no "VI Congresso Internacional sobre Geração Distribuída e Energia no Meio Rural – Agrener 2006", Nipe, Unicamp, 2006.
- LANDELL, M. "ProCana – O Programa Cana-de-Açúcar do Instituto Agrônômico". *O Agrônômico*, Campinas, v. 55 (1), 2003.

- LARSON, E. D. et al. *Large-scale gasification-based co-production of fuels and electricity from switchgrass*. Draft Manuscript to Biomass and Bioenergy, mar. 2006.
- LARSON, E. D. et al. *Gasification based liquid fuels and electricity from biomass with carbon capture and storage*. Apresentado na "IV Annual Conference on Carbon Capture and Sequestration", Alexandria, 2005.
- LARSON, E. D. et al. "A review of biomass integrated-gasifier/gas turbine combined cycle technology and its application in sugarcane industries, with an analysis for Cuba". *Energy for Sustainable Development*, v. V (1), 2001.
- LEAL, M. R. L. V. *Importância do álcool combustível na matriz energética brasileira*. Apresentado no workshop "Álcool de Bagaço de Cana-de-Açúcar", Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo, feb. 2005.
- _____. "The potential of sugarcane as an energy source". *Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists*, v. 26, 2007.
- _____. Informações aos autores, 2008.
- LEITE, R. C. C. *Proálcool, a única alternativa para o futuro*. Campinas: Unicamp, 1990.
- LORA, E. S. "Thermodynamics limits for the production of ethanol and electricity from sugarcane". *Zuckerindustrie*, v. 131 (11), 2006.
- LOWCVP. *Well-to-wheel evaluation for production of ethanol from wheat*. A Report by the LowCVP Fuels Working Group, WTW Sub-Group, Low Carbon Vehicle Partnership, Londres, 2004.
- LUCON, O. *Aspectos ambientais na cadeia de biocombustíveis*. Apresentado no workshop "Aspectos Ambientais da Cadeia do Etanol de Cana-de-Açúcar", Projeto Diretrizes de Políticas Públicas para a Agroindústria Canavieira do Estado de São Paulo, São Paulo, 2008.
- LUENGO, J. M. et al. "Bioplastics from microorganisms". *Current Opinion in Microbiology*, v. 6, 2003.
- LYND, L. R. *Tomorrow's biomass refineries*. Apresentado no "XXVII Symposium on Biotechnology for Fuels and Chemicals", Golden, Colorado, 2005.
- LYND, L. R. et al. "Likely features and costs of mature biomass ethanol technology". *Applied Biochemistry and Biotechnology*, v. 57/58, 1996.
- MACEDO, I. C. "The sugar cane agro-industry and its contribution to reducing CO₂ emissions in Brazil". *Biomass and Bioenergy*, v. 3 (2), 1992.

- _____. "Greenhouse gas emissions and energy balances in bio-ethanol production and utilization in Brazil (1996)". *Biomass and Bioenergy*, v. 14 (1), 1998.
- _____. (coord.). *Sugar cane's energy – Twelve studies on Brazilian sugar cane agribusiness and its sustainability*. São Paulo: Unica, 2005a.
- _____. *Biomass as a source of energy*. Relatório preparado para o InterAcademy Council Study on "Transitions to Sustainable Energy Systems", sep. 2005b.
- _____. "Cana-de-açúcar e energia renováveis no Brasil: a perspectiva tecnológica". *Revista Opiniões*, número especial sobre as energias renováveis, abr.-jun. 2007.
- _____. Informações aos autores, 2008.
- MACEDO, I. C. & HORTA NOGUEIRA, L. A. "Balanço de energia na produção de açúcar e álcool nas usinas cooperadas". *Boletim Técnico Copersucar*, v. 31/85, 1985.
- _____. "Biocombustíveis". *Cadernos NAE 2*, Brasília, Centro de Gestão de Estudos Estratégicos y Núcleo de Assuntos Estratégicos (CGEE/NAE), 2005.
- _____. *Tecnologia e ciência para o desenvolvimento sustentável da bioenergia em São Paulo: cana-de-açúcar e outros vetores bioenergéticos*. Documento preparado para a "Comissão Especial de Bioenergia do Estado de São Paulo", São Paulo, ago. 2007.
- MACEDO, I. C. et al. *Balanço das emissões de gases do efeito estufa na produção e no uso do etanol no Brasil*. São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente, Governo de São Paulo, abr. 2004.
- MACEDO, I. C. et al. *Geração de energia elétrica e de gás de síntese a partir de gaseificação de biomassa*. Funcamp/Unicamp-Nipe/LH2 y Petrobras/Cenpes-Finep, nov. 2006.
- MACEDO, I. C. et al. "Greenhouse gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/2006 averages and a prediction for 2020". *Biomass and Bioenergy*, v. 32 (4), 2008.
- MANDIOCA BRASILEIRA. *Sistema de Informações Agroindustriais da Mandioca Brasileira*. Disponível em: <http://www.mandioca.agr.br>. Acesso em: março de 2008.
- MAPA – MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. *Balanço nacional de cana-de-açúcar e agroenergia*. Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Secretaria de Produção e Agroenergía, 2007.
- _____. *Cronologia da mistura carburante (álcool anidro – gasolina)*. Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Secretaria de Produção e Agroenergía, 2008.

- MARTINOT, E. *Renewables 2007 Global Status Report*. REN 21 Network, 2007. Disponible en: http://www.martinot.info/RE2007_Global_Status_Report.pdf. Acceso en: abril de 2008.
- MCT – MINISTÉRIO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA. *Mudanças climáticas*. Ministério de Ciência e Tecnologia, 2008. Disponible en: <http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/3881.html>. Acceso en: marzo de 2008.
- MEARS, M. *Ethanol Transportation & Distribution*. Magellan Midstream Holdings, apresentação em Power Point para Governors Ethanol Coalition, 2007.
- MEIRELLES, A. J. A. *Expansão da produção de bioetanol e melhoria tecnológica da destilação alcoólica*. Campinas: Unicamp, 2006.
- MILANEZ, A. Y. et al. *Perspectivas para o etanol brasileiro*. Rio de Janeiro: Departamento de Biocombustíveis/BNDES, 2008.
- MME – MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. *Balanço Energético Nacional 2008/ano base 2007*. Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética, 2008.
- MODERN MECHANIX, *Henry Ford discusses America's Industrial Future*, dic. 1934.
- MOLIN, J. P. "Agricultura de precisão em cana-de-açúcar é mais do que uma realidade". *Revista Coplana*, Guariba, ene. 2008.
- MORAES, M. A. F. D. "Número e qualidade dos empregos na agroindústria da cana-de-açúcar". In: MACEDO, I. C. (org.). *A energia da cana-de-açúcar: doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e a sua sustentabilidade*. São Paulo: Unica, 2005.
- _____. "O mercado de trabalho da agroindústria canavieira: desafios e oportunidades". *Economia Aplicada*, Ribeirão Preto, v.11 (4), 2007.
- MOREIRA, J. R. *Water use and impacts due ethanol production in Brazil*. "Linkages between Energy and Water Management for Agriculture in Developing Countries International Conference", Hyderabad, International Water Management Institute and Food and Agriculture Organization of the United Nations, jan. 2007.
- MOREIRA, J. R. & GOLDEMBERG, J. "Política energética no Brasil". *Estudos Avançados*, São Paulo, v. 19 (55), 2005.
- NASTARI, P. "Estrangeiros dobram participação em açúcar e álcool no Brasil". Entrevista à agência Reuters, 25.9.2007.
- _____. *O mercado de etanol*. Apresentado no "I Simpósio Internacional de Combustíveis, Biocombustíveis e Emissões", Datagro, Associação Brasileira de Engenharia Automotiva, São Paulo, mayo de 2008.

- NATIVE. *Projeto Cana Verde*. Disponible en http://www.nativealimentos.com.br/cana_verde. Acceso en: mayo de 2008.
- NCGA – NATIONAL CORN GROWERS ASSOCIATION. *Fossil energy use in the manufacture of corn ethanol*. National Corn Growers Association, 2008. Disponible en: <http://www.ncga.com>. Acceso en: marzo de 2008.
- NEIVA EMBRAER. *Aeronave Ipanema – Vantagens do motor a álcool*. Disponible en: http://www.aeroneiva.com.br/site/content/produtos/produtos_ipanema_vant_alc.asp. Acceso en: marzo de 2008.
- NGUYEN, T. L. T. et al. "Energy balance and GHG-abatement cost of cassava utilization for fuel ethanol in Thailand". *Energy Policy*, v. 35 (9), 2007.
- NIST – NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY. *White paper on internationally compatible biofuels standards*. National Institute of Standards and Technology, 2008. Disponible en: http://www.nist.gov/public_affairs/biofuels_report.pdf. Acceso en: marzo de 2008.
- NONATO, R. V. "Plástico biodegradável a partir de açúcar". Apresentado no "V Workshop Internacional Brasil-Japão em Biocombustível, Meio Ambiente e Novos Produtos da Biomassa", Campinas, 2007.
- NONATO, R. V. et al. "Integrated production of biodegradable plastic, sugar and ethanol". *Applied Microbiology and Biotechnology*, v. 57, 2001.
- NOVOZYMES. *Fuel ethanol production: technological and environmental improvements*. Novozymes & BBI International, 2002.
- NYBOT – NEW YORK BOARD OF TRADE. *Sugar prices – Contract No. 11*. New York Board of Trade, 2008. Disponible en: <http://www.nybot.com/>. Acceso en: enero de 2008.
- OCDE – ORGANIZACIÓN PARA LA COOPERACIÓN Y DESARROLLO ECONÓMICO. *Agricultural market impacts of future growth in the production of biofuels*. Paris: Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico, 2007a.
- _____. *Economic survey of the European Union 2007: reforming agricultural and trade support*. Paris: Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico, 2007b.
- OLADE – ORGANIZACIÓN LATINOAMERICANA DE ENERGÍA. *Sistema de Informaciones Económicas y Energéticas (SIEE)*. Quito: Organización Latinoamericana de Energía, 2006.
- ONDREY, G. "The path to biorefineries". *Chemical Engineering*, v. 113 (4), 2006.

- ORBITAL ENGINE COMPANY. *A literature review based assessment on the impacts of a 10% and 20% ethanol gasoline fuel blend on non-automotive engines*. Orbital Engine Company, relatório para Environment Australia, 2002.
- ORTOLAN, M. C. A. *Relacionamento entre indústrias e fornecedores: mercado atual e futuro*. Apresentado no "I Congresso de Tecnologia na Cadeia Produtiva em Mato Grosso do Sul", Canasul 2007, Campo Grande, 2007.
- OWEN, K. & COLEY, T. *Automotive fuels reference book*. 2ª ed. Nova York: Society of Automotive Engineers, 1995.
- PÁDUA RODRIGUES, A. Informações pessoais. Unica, nov. 2006.
- PESQUISA FAPESP. "Riqueza nas sobras das usinas". *Revista Pesquisa Fapesp*, v. 76, jun. 2002.
- PETROBRAS. *Produtos e Serviços – composição de preços, cadeia de comercialização e composição dos preços da gasolina e do óleo diesel no Rio de Janeiro*. Disponível em; http://www2.petrobras.com/produtos_servicos/. Acesso em: abril de 2008.
- PHILIPPIDIS, G. P. & SMITH, T. K. "Limiting factors in the simultaneous saccharification and fermentation process for conversion of cellulosic biomass to fuel ethanol". *Applied Biochemistry and Biotechnology*, v. 51/52, 1995.
- PHILLIPS, S. et al. *Thermochemical ethanol via indirect gasification and mixed alcohol synthesis of lignocellulosic biomass*. Golden, Colorado: National Renewable Energy Laboratory, 2007 (Technical Report TP-510-41168).
- PIMENTEL, D. & PATZEK, T. W. "Ethanol production using corn, switchgrass, and wood; biodiesel production using soybean and sunflower". *Natural Resources Research*, v. 14 (1), 2005.
- PIRES, A. "Bicombustíveis serão 32% dos carros no Brasil em três anos". Centro Brasileiro de Infra-Estrutura, entrevista publicada em diversos periódicos, Rio de Janeiro, 26.4.2007.
- PIZAIA, W. *Steam economy improvement*. Relatório RLT-025 para MCT/PNUD. Projeto BRA/96/G31, Geração de Energia Elétrica por Biomassa, Bagaço de Cana-de-Açúcar e Resíduos, Brasília, 1998.
- PORDESIMO, L. O. et al. "Distribution of aboveground biomass in corn stover". *Biomass and Bioenergy*, v. 26 (4), 2004.
- PROCANA. *Conheça o setor: dados da safra 2006/07*. Disponível em: <http://www.jornalcana.com.br/Conteudo/>. Acesso em: março de 2008.

- RAGAUSKAS, A. J. et al. "The path forward for biofuels and biomaterials". *Science*, v. 311, ene. 2006.
- RAUCH, R. *Biomass gasification to produce synthesis gas for fuel cells, liquid fuels and chemicals*. Technology Brief, IEA Bioenergy Agreement – Task 33: Thermal Gasification of Biomass, 2002.
- REFUEL. *Eyes on the track, mind on the horizon (from inconvenient rapeseed to clean wood: a European road map for biofuels)*. Disponible en: <http://www.refuel.eu/refuel-project/>. Acceso en: mayo de 2008.
- REN21. *Renewables 2007 Global Status Report*. Washington: Worldwatch Institute, 2008.
- RFA – RENEWABLE FUELS ASSOCIATION. *Annual Industry Outlook 2008*. Renewable Fuels Association, 2008. Disponible en: <http://www.ethanolrfa.org>. Acceso en: febrero de 2008.
- RICCI JR., A. "Proteção de nascentes e cursos de água". In: MACEDO, I. C. (org.). *A energia da cana-de-açúcar: doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e a sua sustentabilidade*. São Paulo: Unica, 2005a.
- _____. "Defensivos: herbicidas". In: MACEDO, I. C. (org.). *A energia da cana-de-açúcar: doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e a sua sustentabilidade*. São Paulo: Unica, 2005b.
- RICUPERO, R. "Mais comida – e muitos mais comensais". *O Estado de S. Paulo*, Caderno Aliás, 4 de mayo de 2008.
- RIDESA. Rede Interuniversitaria para o Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro. Disponible en: <http://www.ridesa.org.br/>. Acceso en: febrero de 2008.
- RIRDC – RURAL INDUSTRIES RESEARCH AND DEVELOPMENT CORPORATION. *Sugar beet preliminary feasibility of ethanol production from sugar beet in NE Tasmania*. Canberra: Department of Primary Industries, Water and Environment, Rural Industries Research and Development Corporation, Australian Government, 2007.
- RISSARDI JR., D. J. & SHIKIDA, P. F. A. "A agroindústria canavieira do Paraná pós-desregulamentação: uma abordagem neoschumpeteriana", *Revista de Economia e Sociologia Rural*, Brasília, v. 45 (2), 2007.
- RODRÍGUEZ, A. G. "Seguridad alimentaria y biocombustibles". In: *Biocombustibles como energía alternativa: una mirada hacia la región*. Quito: Centro Ecuatoriano de Derecho Ambiental, 2007.

- _____. *Análisis de los mercados de materias primas agrícolas y de los precios de los alimentos*. Santiago de Chile: Unidad de Desarrollo Agrícola/Cepal, ago. 2008a (Documento de Trabajo).
- _____. "Information on biofuel commodity prices (based on World Bank data)". In: CEPAL. *Unidad de desarrollo agrícola*. Santiago: Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 2008b.
- ROSSELL, C. E. V. & OLIVÉRIO, J. L. *Produção de álcool a partir do bagaço: o processo DHR – Dedini Hidrólise Rápida*. Dedini S/A Indústrias de Base, Piracicaba, mar. 2004.
- ROSSETTO, R. "A cultura da cana, da degradação à conservação". *Visão Agrícola*, Esalq-USP, año 1, 2004.
- SACHS, I. *Brasil: desafios da energia para o desenvolvimento sustentável*. Palestra proferida no Memorial da América Latina, São Paulo, mar. 2007.
- SALIH, F. M. & ANDREWS, G. E. *The influence of gasoline/ethanol blends on emissions and fuel economy*. "Society of Automotive Engineers Fuel and Lubricants Meeting", San Francisco, 1992 (SAE Paper 922378).
- SCANDIFFIO, M. I. G. *Análise prospectiva do álcool combustível no Brasil – Cenários 2004–2024*. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, 2005 (Tesis de Doctorado).
- SCANIA. "New highly efficient diesel-ethanol engine – ready to cut fossil CO₂ emissions by 90%" *Scania Press Info*, P07503EN, mayo 2007.
- SCARAMUCCI, J. A. & CUNHA, M. P. "Aspectos sócio-econômicos do uso energético da biomassa de cana-de-açúcar". In: CORTEZ, L. A. B. & LORA, E. E. S. *Tecnologias de conversão energética da biomassa*. 3ª ed. Campinas: Unicamp (en prensa).
- SCHUCHARDT, U. et al. "A indústria petroquímica no próximo século: como substituir o petróleo como matéria prima?". *Química Nova*, v. 24, n. 2, 2001, pp. 247-251.
- SCIENTIFIC AMERICAN BRASIL. "Mistura em pleno vôo: depois de inovar com o avião a álcool, país desenvolve motor aeronáutico flex fuel". *Scientific American Brasil*, n. 44, ene. 2006.
- SEABRA, J. E. A. *Análise de opções tecnológicas para uso integral da biomassa no setor de cana-de-açúcar e suas implicações*. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, 2008 (Tesis de Doctorado).

- SEABRA, J. E. A. & MACEDO, I. C. *Demanda de energia para a produção de PHB a partir do açúcar da cana*. Reporte preparado para PHB Industrial S.A., Campinas, 2006.
- SERÔA DA MOTTA, R. & FERREIRA, L. R. "The Brazilian National Alcohol Programme: an economic reappraisal and adjustments". *Energy Economics*, jul. 1988.
- SILVESTRIN, C. R. *Dependência Elétrica de São Paulo: Desafios & Oportunidades*. São Paulo: Cogen-SP, Secretarias de Desenvolvimento e de Saneamento e Energia do Estado de São Paulo, março de 2007.
- SMA – SECRETARIA DE MEIO AMBIENTE DO ESTADO DE SÃO PAULO. "Vinhaça: critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola". *Norma Técnica Cetesb P4.231*, Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, 2005.
- SMEETS, E. et al "A bottom-up assessment and review of global bio-energy potentials to 2050". *Progress in Energy and Combustion Science*, doi:10.1016/j.pecs.2006.08.001, 2006.
- SMEETS, E. et al. *Sustainability of Brazilian bio-ethanol*. Utrecht/Campinas: Copernicus Institute/ Utrecht University, Universidade Estadual de Campinas, 2006 (Report NWS-E-2006-110).
- SMIL, V. *General energetics: energy in the biosphere and civilization*. Nova York: Wiley, 1991.
- SOARES, M. L. Q. *Direitos humanos, globalização e soberania*. Belo Horizonte: Inédita, 1997.
- SOARES, R. A. B. *Uso da agricultura de precisão na Usina Jalles Machado*. Apresentado en el "Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão – Conbap 2006", Piracicaba, 2006.
- SOPRAL – SOCIEDADE DE PRODUTORES DE AÇÚCAR E DE ÁLCOOL. *Avaliação de caminhões e tratores a álcool*. Coleção Sopral 3. Sociedade de Produtores de Açúcar e de Álcool, 1983.
- SOW-VU. *China's rapidly growing meat demand: a domestic or an international challenge?* Amsterdam: Centre for World Food Studies, 2007.
- SOUZA, S. A. V. "Disponibilidade e uso de água no Brasil: irrigação". In: MACEDO, I. C. (org.). *A energia da cana-de-açúcar: doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e a sua sustentabilidade*. São Paulo: Unica, 2005a.
- _____. "Vinhaça: o avanço das tecnologias de uso". In: MACEDO, I. C. (org.). *A energia da cana-de-açúcar: doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e a sua sustentabilidade*. São Paulo: Unica, 2005b.
- Steenblik, R. *Liberalising trade in "environmental goods": some practical considerations*. Paris: OCDE, 2005 (OECD Trade and Environment Working Paper No. 2005-05).

- STRAPASSON, A. "Governo prepara estudo para mapear áreas adequadas para plantio de cana-de-açúcar em grande escala" [Informaciones prestadas en la nota]. *Inovação Unicamp*, 10 de marzo de 2008.
- SUN, Y. & CHENG, J. "Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review". *Bioresource Technology*, v. 83, 2002.
- SZMRECSÁNYI, T. *O planejamento da agroindústria canavieira no Brasil (1930-1975)*. São Paulo: Hucitec, 1979.
- SZWARC, A. Informações aos autores. Unica, abril de 2008.
- TEIXEIRA, C. G. et. al. "Utilização do sorgo sacarino como matéria-prima complementar à cana-de-açúcar para obtenção de etanol em micro-destilaria". *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, Campinas, v.17 (3), 1997.
- TEREOS. *Bio-ethanol*. Disponible en: <http://www.tereos.com>, Acceso en: mayo de 2006.
- THE HOUSE OF COMMONS. "Are biofuel sustainable?". *First Report of Session 2007–08*, Environmental Audit Committee, Londres, 2008.
- TOYOTA. *Support for diversification of alternative fuels*. Toyota Technology, 2007. Disponible en: <http://www.toyota.co.jp/en/tech/environment/powertrain/>. Acceso en: noviembre de 2007.
- TRINDADE, S. *Fuel ethanol issues in thailand: ethanol production, stillage disposal and market penetration*. Report to UN/DTCD (draft), Nova York, 1985.
- TROSTLE, Ronald. *Global agricultural supply and demand: factors contributing to the recent increases in food commodity prices*. Washington, D.C.: Economic Research Services, United States Department of Agriculture, mayo de 2008 (WRS-0801).
- TSB – TRANSPORTATION SYSTEMS BRANCH. *Use of higher than 10 volume percent ethanol/gasoline blends in gasoline powered vehicles*. Ottawa: Transportation Systems Branch, Air Pollution Prevention Directorate, Environment Canada, 1998.
- TURKENBURG, W. C. et al. "Renewable energy technologies". In: GOLDEMBERG, J. (ed.). *World energy assessment of the United Nations*. Capítulo 7. Nova York: UNDP, Undesa/WEC. UNDP, 2000.
- TURNER, T. "Biofuels, agriculture and the developing world". In: *Linking trade, climate change and energy*. Ginebra: ICTSD, 2006. Disponible en: http://www.trade-environment.org/output/ictsd/resource/Energy_issuebriefs.pdf. Acceso en: abril de 2008.

- ULATE, W. *Perspectivas de uso actual y futuro de etanol carburante en Costa Rica*. San José: Refinería Costarricense de Petróleo, 2006.
- UNDP – UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAM. *Human development report 2007/2008 – Fighting climate change: human solidarity in a divided world*. Nova York: United Nations Development Program, 2007.
- UN-ENERGY. *Sustainable bioenergy: a framework for decision makers*. Nova York: United Nations, 2007. Disponible en: <http://esa.un.org/un-energy/pdf/susdev.Biofuels.FAO.pdf>. Acceso en: mayo de 2008.
- UNEP – UNITED NATIONS ENVIRONMENTAL PROGRAM. *Working papers 2007*. United Nations Environmental Program, 2008. Disponible en: www.unep.org. Acceso en: marzo de 2008.
- UNFCCC – UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. *Kyoto Protocol*. United Nations Framework Convention on Climate Change, 2008. Disponible en: http://unfccc.int/kyoto_protocol/items/2830.php, Acceso en: abril de 2008.
- UNICA – UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR. *Produção e uso do etanol combustível no Brasil: respostas às questões mais freqüentes*. São Paulo: União da Indústria de Cana-de-Açúcar, 2007.
- _____. *Estatísticas*. União da Indústria de Cana-de-Açúcar, 2008. Disponible en: <http://www.portalunica.com.br>. Acceso en: enero de 2008.
- UNITED NATIONS. *Our common future*. Nova York: World Commission on Environment and Development, 1987.
- UPME – UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA. *Los biocombustibles en Colombia*. Bogotá: Ministerio de Energía y Minas, Unidad de Planeación Minero Energética, 2006.
- URQUIAGA, S. et al. *A importância de não queimar a palha na cultura da cana-de-açúcar*. Seropédica: Embrapa, Centro Nacional de Pesquisa de Biologia do Solo, 1991.
- USDA – UNITED STATE DEPARTMENT OF AGRICULTURE. *Data and Statistics*. United State Department of Agriculture, 2008. Disponible en: <http://www.usda.gov>. Acceso en: febrero de 2008.
- VAN DER LAAN, G. P. *Kinetics, selectivity and scale up of the Fischer-Tropsch Synthesis*. Groningen: University of Groningen, 1999 (Tesis de Doctorado).
- VARGAS, M. *História da técnica e da tecnologia no Brasil*. São Paulo: Unesp, 1994.
- VENTURI, P. & VENTURI, G. "Analysis of energy comparison for crops in European agricultural systems". *Biomass and Bioenergy*, v. 25 (3), 2003.

- VIEIRA, M. C. A. et al. *Setor sucroalcooleiro brasileiro: evolução e perspectivas*. Rio de Janeiro: Deagro/BNDES, 2006.
- WALTER, A. C. S. & ENSINAS, A. *Produção de eletricidade a partir da biomassa da cana-de-açúcar*. Apresentado no workshop "Abimaq", Ribeirão Preto, 2006.
- WALTER, A. C. S. & HORTA NOGUEIRA, L. A. "Produção de eletricidade a partir da biomassa". In: CORTEZ, L. A. B. & LORA, E. E. S. *Tecnologias de conversão energética da biomassa*. 2ª ed. Manaus: Universidade do Amazonas, 2007.
- WASTE ONLINE. *Plastics recycling information sheet*. Disponible en: <http://www.wasteonline.org.uk>. Acceso en: febrero de 2008.
- WERPY, T. A. et al. *Top value added chemicals from biomass*. Apresentado no "XXVII Symposium on Biotechnology for Fuels", Golden, Colorado, 2005.
- WHIMS, J. *Pipelines considerations for ethanol*. Sparks Companies, Inc., Agricultural Marketing Resource Center, Kansas State University, 2002.
- WHITE HOUSE. *New Energy Act 2007*. Disponible en: <http://www.whitehouse.gov/news/releases/2007/12/20071219-1.html>. Acceso en: abril de 2008.
- WILLIAMS, R. H. et al. *Low-carbon liquid fuel and electricity from coal and crop residues with CO₂ capture and storage*. Apresentado no GCEP International Workshop (Stanford University, Tsinghua University and Zhejiang University), Beijing, 2005.
- WOLF, J. et al. "Exploratory study on the land area required for global food supply and the potential global production of bioenergy". *Agricultural Systems*, v. 76 (3) 2003.
- WOOLEY, R. et al. *Lignocellulosic biomass to ethanol – Process prehydrolysis and enzymatic hydrolysis – Current and futuristic scenarios*. Golden, Colorado: National Renewable Energy Laboratory, 1999 (Report TP-580-26157).
- WORLD BANK, *Rising food prices: Policy options and World Bank response*. Washington: World Bank, 2007a.
- _____. *World Development Report 2008*. Washington: World Bank, 2007b.
- _____. *A 10-point plan for the food crisis*. Washington: World Bank, 2008.
- WYMAN, C. E. *Handbook on bioethanol: production and utilization*. Applied Energy Technology Series. Washington: Taylor & Francis, 1996.

_____. "What is (and is not) vital to advancing cellulosic ethanol". *Trends in Biotechnology*, doi:10.1016/j.tibtech.2007.02.009, 2007.

YACOBUCCI, B. D. "Ethanol imports and the Caribbean Basin Initiative". *CRS Report for Congress*, 2006.

YACOBUCCI, B. D. & WOMACH, J. "Fuel ethanol: background and public policy issues". *CRS Report for Congress*, n. RL30369, Summary, 21 feb. 2002.

ZACCHI, G. *The state of the art and future trends of ligno-cellulose biomass conversion to ethanol*. Apresentado na Unicamp, Campinas, feb. 2007.

Coordinación Editorial
Dirección de Publicaciones del BNDES

Diseño Gráfico
Ana Luisa Silveira Gonçalves

Producción Editorial
Editora Senac Rio

Traducción
Grupo Primacy Translations

Edición Electrónica
Abreu's System

Impresión
Imprinta Express Gráfica e Editora

Las fotos al inicio de cada capítulo fueron
gentilmente cedidas por Unica, Iaco Agrícola y
Santelisa Vale.

El contenido de los capítulos es de exclusiva
responsabilidad de los autores, siendo de BNDES la
coordinación editorial y el diseño gráfico.

