

Bioetanol de caña de azúcar

Una energía para el desarrollo sostenible

Resumen ejecutivo

BNDES, CGEE, FAO y CEPAL

2008

Resumen ejecutivo¹

La creciente necesidad de ampliar de modo sostenible el uso de fuentes renovables de energía, para proporcionar mayor seguridad al suministro energético y reducir los impactos ambientales asociados a los combustibles fósiles, encuentra en el bioetanol de caña de azúcar una alternativa económicamente viable y con significativo potencial de expansión. La producción y el uso de bioetanol como combustible automotriz se practican regularmente en Brasil desde 1931, con una notable evolución durante las últimas décadas, alcanzando madurez y consistencia, de acuerdo con un modelo productivo que puede ser adaptado e implementado en contextos similares. Por medio del bioetanol y de la bioelectricidad, la caña de azúcar representa actualmente la segunda más importante fuente primaria y la principal forma de energía renovable en la matriz energética brasileña.

Esta obra presenta, desde varios puntos de vista, las características de este biocombustible y de su agroindustria, con énfasis en la experiencia brasileña y, en algunos casos, cotejando con otras tecnologías bioenergéticas. Desarrollado en nueve capítulos, brevemente descritos a continuación, el trabajo se orienta a lectores brasileños y de otros países con interés en bioetanol y bioenergía.

Bioenergía y biocombustibles

Por medio de la fotosíntesis, la radiación solar se transforma en productos vegetales, que pueden ser utilizados como combustible, directamente o después de procesados. La leña de eucalipto y el bioetanol, producido a base de caña de azúcar o de maíz, son ejemplos de vectores bioenergéticos. En sus formas tradicionales, el uso de la bioenergía se confunde con la historia de la humanidad, pero, mediante tecnologías modernas y eficientes, como biocombustibles líquidos, está siendo considerado en los últimos tiempos una fuente energética renovable alternativa a los combustibles fósiles, capaz de atenuar graves problemas ambientales. Una condición fundamental a ser observada para la viabilidad de la producción bioenergética es la eficiencia en la

¹ Las referencias bibliográficas fueron suprimidas. Por más detalles referirse al texto completo original.

captación de la energía solar, asociada a la productividad por unidad de recursos naturales utilizados.

La productividad vegetal depende, esencialmente, de las condiciones climáticas (disponibilidad hídrica, insolación y temperatura) y de la fertilidad del suelo cultivado, variando de acuerdo con la especie vegetal. Entre las plantas utilizadas para fines bioenergéticos, se destacan las gramíneas, como es el caso de la caña de azúcar, cuya eficiencia fotosintética es de las más altas entre todos los vegetales. Tomando en consideración tales presupuestos, las regiones tropicales húmedas, especialmente Latinoamérica y África, se presentan indiscutiblemente como las más prometedoras para la producción bioenergética, a ser promovida naturalmente de forma sostenible.

Sin considerar la bioenergía como la virtual sustituta de todas las formas convencionales de energía en uso por la sociedad moderna, sino una componente necesaria de un nuevo contexto, se constata que, en carácter global, existe una gran disponibilidad de área para la producción vegetal y un uso todavía muy limitado de la radiación solar, que incide generosamente en amplias regiones del planeta. De este modo, es razonable suponer que en los próximos años la bioenergía se desarrolle de modo importante.

Etanol como combustible vehicular

El etanol presenta algunas diferencias importantes con relación a los combustibles convencionales, derivados de petróleo. La principal de ellas, es la elevada concentración de oxígeno, que representa cerca del 35% de la masa de etanol. En general, las características del etanol permiten una combustión más limpia y un mejor desempeño de los motores (ciclo Otto), lo que conlleva a la reducción de las emisiones contaminantes. Para el uso de etanol hidratado puro (con cerca del 5% de agua), se necesita adaptar los motores, pero, cuando se trata de mezclas con concentraciones de hasta 10% de etanol, se pueden utilizar los motores convencionales a gasolina sin cualquier ajuste. En los motores flexibles (*flex-fuel vehicle* – FFV), con gran penetración en el mercado brasileño, se pueden utilizar mezclas con cualquier concentración de etanol.

En comparación a la gasolina pura, un análisis detallado de los aspectos más relevantes del uso de las mezclas gasolina/etanol, como octanaje, volatilidad, desempeño, separación de fases, compatibilidad de materiales (elastómeros y metales) y emisiones de gases de escape (incluyendo monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, de azufre y aldehídos), muestra como este biocombustible puede ser utilizado sin problemas de orden

técnico y ambiental. En efecto, la expresiva mayoría de los fabricantes de automóviles acepta el uso de gasolina con un 10% de etanol en sus motores.

Confirmando la madurez de este biocombustible, diversos motores aeronáuticos (para aviones agrícolas y de pequeño porte) fueron homologados para uso de etanol puro. El uso de etanol en motores diesel presenta perspectivas interesantes, pero aún se encuentra en desarrollo.

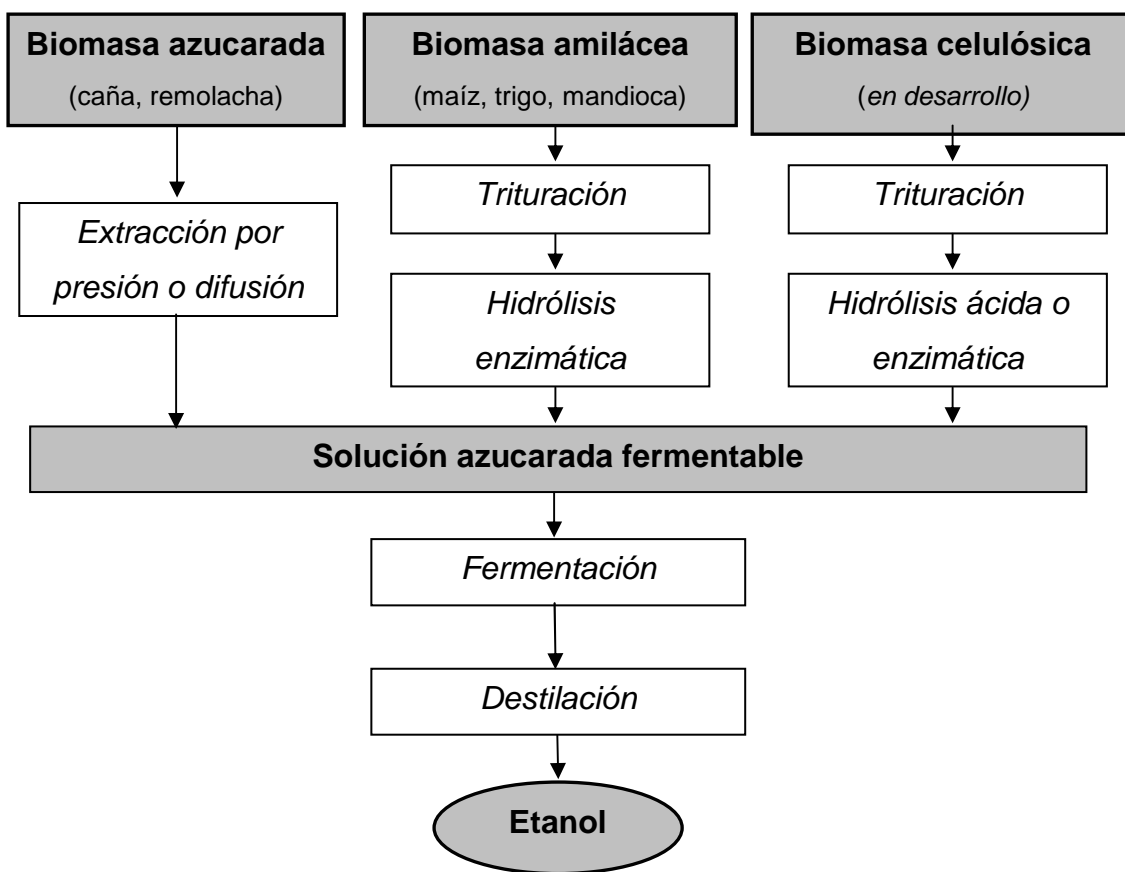
Desde el punto de vista económico, el análisis de los costos de oportunidad del bioetanol de caña de azúcar, frente al azúcar y a la melaza, y la comparación de los precios pagos a los productores de bioetanol en Brasil con los precios internacionales de la gasolina durante la última década, confirman la atractividad del empleo de este biocombustible y refuerzan la importancia de que se promueva en bases competitivas, y en la medida de lo posible, bajo reducida intervención gubernamental. No obstante, para desarrollar adecuadamente el mercado del bioetanol y potencializar sus ventajas, el Estado debe asumir responsabilidades importantes, como definir las especificaciones del bioetanol y las concentraciones mínimas obligatorias de mezcla en la gasolina, así como establecer un marco tributario equilibrado en el mercado de los combustibles.

Para completar la revisión de los aspectos relacionados al uso de etanol como combustible, cabe comentar la logística para este biocombustible, en que la estacionalidad de la producción impone la formación de existencias de entre zafras, cuyo volumen depende directamente de la extensión del período productivo. Para el transporte del bioetanol, se puede recurrir a los modos usualmente empleados para los demás combustibles, inclusive ductos.

Producción de bioetanol

La producción de bioetanol se realiza en bases comerciales y por dos vías tecnológicas, utilizando materias primas dulces, directamente fermentables, como la caña de azúcar y la remolacha azucarera, o materias primas amiláceas, como el maíz y el trigo, cuyo almidón debe ser convertido en azúcares (sacarificado) antes de la fermentación, como se esquematiza en la Figura 1. Una tercera vía, utilizando la biomasa disponible en materiales como el bagazo y la paja, hidroliza las cadenas celulósicas y produce una solución fermentable de azúcares, presentando gran interés gracias al bajo costo de la materia prima. Con todo, esta vía de valorización energética de la biomasa aún no está disponible en escalas comerciales, aunque haya expectativas de que en los próximos años pueda alcanzar viabilidad económica.

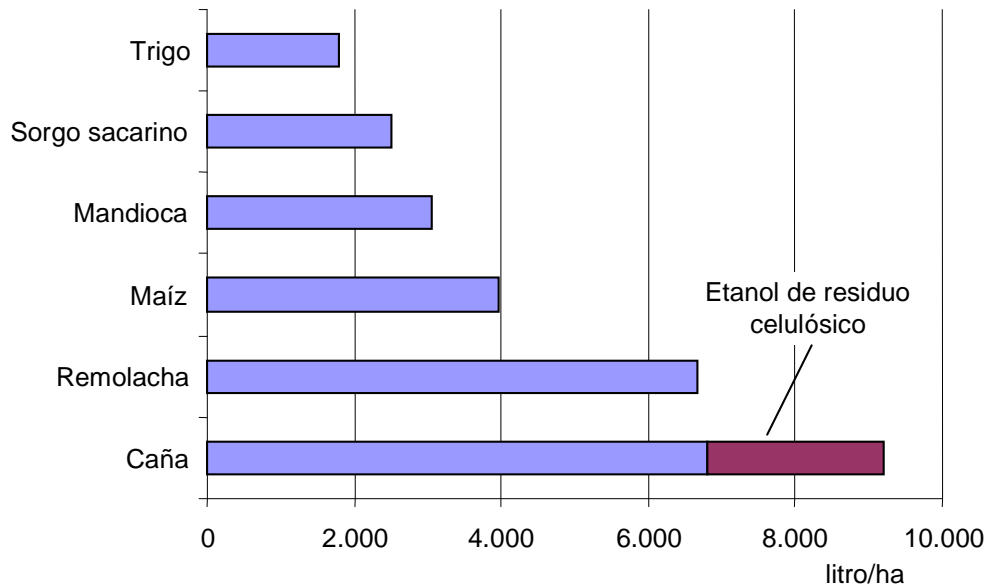
Figura 1 – Vías tecnológicas para la producción de bioetanol



Fuente: Elaboración de Luiz Augusto Horta Nogueira.

En función de las diferencias en las productividades agrícola e industrial, los volúmenes de bioetanol producido por unidad de área cultivada varían bastante, de acuerdo con el Gráfico 1. En el caso de la caña de azúcar, son valores representativos una productividad agrícola de 80 toneladas de caña de azúcar por hectárea y un rendimiento industrial de 85 litros de bioetanol, resultando en una producción de 6.800 litros de bioetanol por hectárea cultivada. En este gráfico, para la caña de azúcar, se considera además la producción de etanol de los residuos celulósicos, tecnología aún en desarrollo, asumiendo la utilización del 30% del bagazo disponible y mitad de la paja, convertida en bioetanol a razón de 400 litros por tonelada de biomasa celulósica seca. De los 51 mil millones de litros de bioetanol producidos en 2006, la producción norteamericana, a base de maíz, y la brasileña, a base de caña, representaron un 70% del total. Los otros grandes productores de bioetanol son India, China y la Unión Europea, pero en escala mucho menor.

Gráfico 1 – Productividad promedio de bioetanol por área para diferentes cultivos

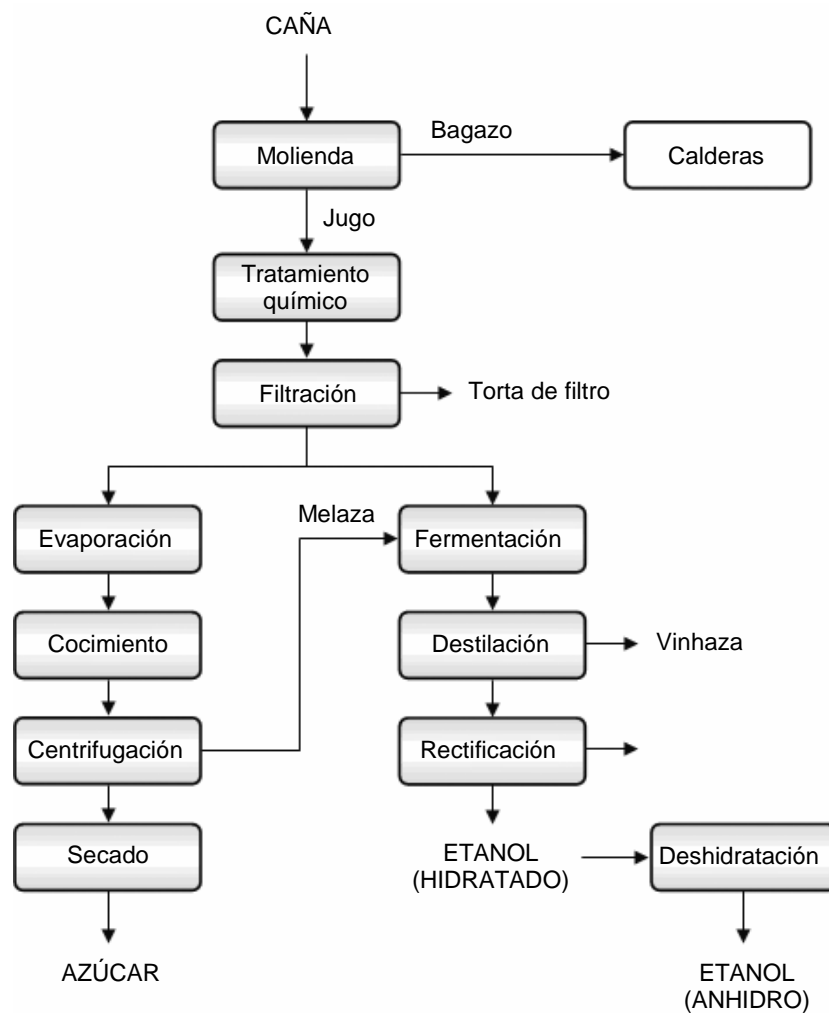


Fuente: Modificado de GPC (2008).

Uno de los cultivos de mayor importancia en todo el mundo, la caña de azúcar ocupa más de 20 millones de hectáreas, en las cuales fueron producidos cerca de 1.300 millones de toneladas en 2006/2007, con destaque para Brasil, que con un área plantada de cerca de 7 millones de hectáreas, respondió por cerca del 42% del total producido. El clima ideal para el cultivo de la caña es aquel que presenta dos estaciones distintas: una caliente y húmeda para inducir la germinación, formación de los brotes y el desarrollo vegetativo, seguida de otra fría y seca, para fomentar la maduración y la consiguiente acumulación de sacarosa en las estacas. El ciclo productivo de la caña de azúcar es generalmente de seis años dentro del cual ocurren cinco cortes, cuatro tratos con socas y una reforma, con reducción gradual de la productividad, que hace más interesante reformar el cañaveral que efectuar un nuevo corte. El período de la cosecha de la caña varía de acuerdo con el régimen de lluvias, para posibilitar las operaciones de corte y transporte y para permitir alcanzar el mejor punto de madurez y acumulación de azúcares. En las condiciones medias del Centro Sur brasileño, la caña cosechada presenta concentraciones de sacarosa y de fibra del orden de 14% y 13% respectivamente.

En el contexto brasileño, la producción de bioetanol de caña de azúcar se realiza generalmente en unidades agroindustriales que producen también azúcar, dando origen a melazas que pueden, conjuntamente con el jugo de caña, componer mostos fermentables, como se muestra en la Figura 2. Así, se consigue una buena sinergia entre los dos procesos productivos que utilizan en común los equipos de extracción (típicamente molindas, pero recientemente pasaron a ser adoptados también difusores) y los sistemas auxiliares y de utilidades. Después de la fermentación del mosto, las levaduras se recuperan y el vino resultante sigue para destilación, en la cual se produce bioetanol.

Figura 2 – Esquema de la producción de azúcar y bioetanol de caña



Fuente: Seabra (2008).

El proceso industrial consume significativa cantidad de energía térmica y eléctrica, pero, en el caso de la agroindustria a base de caña, estas demandas pueden ser atendidas por un sistema combinado de producción de calor y potencia (sistema de cogeneración) instalado en el propio ingenio. Este sistema utiliza sólo el bagazo como combustible y además puede generar excedentes para la red pública.

La otra materia prima importante para la producción de bioetanol, el maíz, se cultiva actualmente en todos los continentes y ocupa cerca de 147 millones de hectáreas, en los cuales fueron producidos cerca de 725 millones de toneladas en 2004, constituyendo un importante componente de la oferta de alimentos en varios países, como alimento humano y animal. En 2006, la producción americana fue superior a los 267 millones de toneladas de granos, para un área cosechada de poco más de 28 millones de hectáreas. Casi un 20% de la producción se destina a la fabricación de bioetanol.

El bioetanol se puede producir del maíz por medio de dos procesos, adoptando molienda húmeda o seca. La vía húmeda era la opción más común hasta los años 1990, pero hoy en día, la vía seca se consolidó como el proceso más utilizado para la producción de bioetanol. En el proceso húmedo, las diferentes fracciones del grano de maíz son separadas, haciendo posible la recuperación de diversos productos, como proteínas, nutrientes, gas carbónico, almidón y aceite de maíz. El almidón (y, por consiguiente, el bioetanol) se produce en mayor volumen, con rendimientos en torno a los 440 litros de bioetanol por tonelada de maíz. Ya en la vía seca, el único coproducto del bioetanol es un suplemento proteico para alimentación animal y la producción de bioetanol puede ser un poco menor.

Para las demás materias primas, los procesos son similares, dependiendo de las características de la biomasa, que puede contener azúcares o almidón. Así, se pueden utilizar de modo semejante a la caña, el sorgo sacarino y la remolacha, y de modo semejante al maíz, la mandioca y el trigo, entre otros cultivos.

Por la diversidad de alternativas de materias primas para la fabricación de bioetanol, es importante observar que las más adecuadas son aquellas que, en un sentido amplio, se muestran más eficientes. Así, cabe priorizar los cultivos que minimicen los requerimientos de tierra, agua y aportes externos de agroquímicos, entre otros aspectos. Además de ello, la viabilidad económica debe ser tomada en cuenta: no tiene mucho sentido proponer el uso de cultivos nobles y con buen valor de mercado como fuente de bioenergía. La materia prima representa, típicamente, entre 60% y 70% del costo final del bioetanol y la búsqueda de alternativas de bajo costo es

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

Otro punto relevante para la adecuada selección de biomásas con potencial para producción de bioetanol es el balance energético de cada una de ellas, o sea, la relación entre la energía producida y la demanda de energía directa e indirecta para producir tal energía. En este sentido, son más interesantes los cultivos de alta productividad y baja demanda de insumos energéticos exógenos. Como una consecuencia natural de los balances energéticos, es posible estimar los niveles de emisión de gases de efecto invernadero (GEI), aspecto relevante en la evaluación de los biocombustibles y bastante diferenciado en función de la materia prima utilizada. Considerando los cultivos usualmente mencionados como de interés para la producción de bioetanol, en la Tabla 1 se presentan valores para el balance energético y el nivel de mitigación de las emisiones de GEI.

[Tabla 1] - Comparación de las diferentes materias primas para la producción de bioetanol

Materia prima	Relación de energía	Emisiones evitadas
Caña	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%

*Estimativas teóricas, proceso en desarrollo.

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

La efectiva reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero es posiblemente 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 el Cambio Climático, con valores para 1994, el uso de la energía de la caña redujo en un 13% las emisiones de carbono de todo el sector energético. En las condiciones actuales, para cada 100 millones de toneladas de caña

de azúcar destinadas a fines energéticos, podría evitarse la emisión de 12,6 millones de toneladas de CO₂ equivalente, considerando bioetanol, bagazo y el excedente adicional de energía eléctrica suministrada a la red.

Coproductos del bioetanol de caña de azúcar

Además del bioetanol, la agroindustria de caña de azúcar produce una gama creciente de otros productos de uso final y materias intermediarias, que amplían su significado económico y permiten, mediante sinergias interesantes, agregar valor al proceso como un todo. Entre esos productos, se destacan el azúcar, producto pionero y tradicional de esta industria, y en los últimos años, la energía eléctrica.

Actualmente, más de 130 países producen azúcar, cuya producción mundial en la zafra 2006/2007 alcanzó las 164,5 millones de toneladas. Cerca del 78% del total fue producido de caña de azúcar cultivada principalmente en regiones tropicales y subtropicales del hemisferio Sur, y el restante utilizó la remolacha azucarera, cultivada en zonas templadas del hemisferio Norte. Como los costos de producción de azúcar de caña son inferiores a los costos a base de remolacha, cada vez más se amplía la fracción producida por los países en desarrollo, a medida que se retiran las barreras comerciales que impiden el libre comercio de ese producto.

El consumo mundial de azúcar se ha estado expandiendo de modo regular a una tasa anual del 2% a lo largo de las últimas décadas, lo que significa cerca de 3 millones de toneladas más en la demanda, a cada año. El crecimiento ocurre principalmente en los países en desarrollo, como un reflejo del aumento de la renta de los consumidores y de los cambios en los patrones de alimentación. Estos mercados ya representan actualmente más del 60% del actual consumo mundial de azúcar.

La producción de azúcar muestra una amplia gama de costos de producción. Brasil presenta el menor costo entre todos los países productores, lo que se debe en gran parte al desarrollo de la tecnología agrícola e industrial asociada a la expansión de la producción de bioetanol.

La bioelectricidad se produce desde hace décadas en la agroindustria de la caña de azúcar, utilizando el bagazo como combustible en sistemas de cogeneración que atienden también, con elevada eficiencia, las necesidades de potencia mecánica y de calor de proceso. Durante décadas, la producción de energía eléctrica se limitaba a atender las necesidades propias de la agroindustria. No obstante, con la evolución del marco regulatorio del sector eléctrico se hizo posible incrementar el desempeño de los sistemas de cogeneración que pasaron a generar excedentes para la red pública, con

creciente importancia económica, contribuyendo para la oferta de electricidad en muchos países, como Brasil.

Como indicadores de la mayor disponibilidad de energía eléctrica, mientras las condiciones típicas de las calderas empleadas en los ingenios brasileños durante los años ochenta permitía producir excedentes del orden de las 10 kWh/tc (tonelada de caña procesada), actualmente alcanzan cerca de 28 kWh/tc en la mayoría de las unidades productoras y 72 kWh/tc en los ingenios más modernos. Con la utilización de parte de la paja de la caña cosechada y mejoras en el proceso industrial, los excedentes de energía eléctrica podrán alcanzar más de 150 kWh/tc. A inicios de 2008, la capacidad instalada en los ingenios de azúcar y bioetanol en Brasil era de 3,1 GW, con perspectivas de que la generación de energía eléctrica para la red pública a base de bagazo pueda alcanzar los 15 GW hasta el 2015, o un 15% de la actual potencia instalada en las centrales eléctricas brasileñas.

Una evaluación de los costos de oportunidad del bagazo – de acuerdo con escenarios prospectivos de rendimientos y costos de capacidad, en las configuraciones típicas de precios del bioetanol y de la bioelectricidad – indica que la producción de energía eléctrica tiende a ser más atractiva que la producción de biocombustible.

La producción de energía eléctrica a base de bagazo es elegible para la obtención de créditos de carbono, presentando adicionalidad y una metodología aprobada para cuantificación y certificación de esos créditos, en los términos del Mecanismo de Desarrollo Limpio, de conformidad con lo establecido en el Protocolo de Kyoto.

La caña de azúcar permite producir mucho más que bioetanol, azúcar y electricidad. Entre los coproductos tradicionales de la caña, podrían citarse la melaza, el aguardiente, el bagazo, la levadura, la torta de filtro y la vinaza, mientras la lista de los nuevos productos, numerosa y variada, incluye desde realzadores de sabor para la industria de alimentos hasta plástico para embalajes. Un estudio publicado en 2005 presenta más de 60 tecnologías empleando la caña de azúcar como materia prima en diferentes sectores industriales, en buena parte relacionados con la industria de alimentos.

Tecnologías avanzadas en la agroindustria de la caña de azúcar

Además de los productos y procesos comentados anteriormente, han sido propuestas tecnologías innovadoras para la utilización de la caña de azúcar como insumo industrial y energético. Tales tecnologías involucran la producción de bioetanol y bioelectricidad y consideran procesos volcados a la valorización de los materiales lignocelulósicos, mediante su hidrólisis o gasificación, y la producción de plásticos

biodegradables. En este capítulo, estos temas que constituyen líneas de investigación y desarrollo, en algunos casos en plantas piloto, se comentan en sus aspectos tecnológicos y en cuanto a su viabilidad económica.

Las tecnologías de hidrólisis para la obtención de bioetanol a base de materiales lignocelulósicos incluyen el fraccionamiento 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 remoción de la lignina. Hay una gran influencia de la composición y de la estructura de la materia prima sobre el desempeño de los procesos, siendo relevantes las fases iniciales de preparación y pre-tratamiento. Son igualmente importantes los procesos de fermentación de las pentosas, poco desarrollados aún. Aunque la hidrólisis con ácido diluido esté en una etapa de perfeccionamiento más avanzado que las demás vías, la hidrólisis enzimática tiene más viabilidad y concentra actualmente mayor atención, en especial en los procesos con sacarificación y fermentación simultáneas.

Menos trabajada, pero no menos importante, la otra línea de estudios para la valorización de los residuos lignocelulósicos de la agroindustria emplea procesos térmicos, mediante su gasificación y posterior conversión del gas obtenido en biocombustible o bioelectricidad. Las reacciones involucradas son complejas y el diseño de los gasificadores todavía es relativamente limitado en capacidad, imponiendo mayores esfuerzos para su desarrollo. La generación de energía eléctrica asociada a la gasificación de biomasa podrá permitir el empleo de turbinas a gas y ciclos combinados de alta eficiencia, pero la alimentación y la operación de gasificadores presurizados de gran capacidad, la limpieza del gas, con la separación de álcalis y particulados, así como la modificación de las turbinas a gas para uso de combustible con bajo poder calorífico son aspectos no totalmente ecuacionados. En la vertiente de uso del gas de biomasa para la síntesis de biocombustibles, particularmente en los procesos tipo Fischer-Tropsch, también hay gran interés e igual necesidad de perfeccionamiento de los procesos, equipos y catalizadores, con expectativas de viabilidad económica a medio plazo.

Un extenso campo de aplicaciones para la caña de azúcar y para el bioetanol, en especial, es la producción de polímeros diversos, sea en el contexto de la industria petroquímica convencional – que pasó a incluir el bioetanol entre los insumos para la fabricación de etileno y otros productos intermediarios - , sea en el ámbito de la llamada etanolquímica, que contempla procesos más específicos y avanzados, como la fabricación de plásticos biodegradables, actualmente en desarrollo en Brasil.

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

El 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, desde la progresiva construcción de un andamiaje institucional y la evolución de los parámetros técnicos agroindustriales, que trazan una trayectoria ejemplar de ganancias de productividad, hasta la gradual ampliación de los beneficios ambientales, como la reducción de la demanda de agua y el uso creciente de procesos de reciclaje.

En el desarrollo histórico del uso de bioetanol como combustible en Brasil, intervinieron visionarios y técnicos dedicados, al mismo tiempo en que se estableció de a poco una base legal e institucional que le permitió a ese biocombustible transformarse en un componente regular de la matriz energética brasileña. En 1931, en base a los buenos resultados de pruebas de campo de vehículos utilizando bioetanol y con el objetivo de reducir los impactos de la total dependencia de combustible derivados de petróleo, así como de utilizar los excedentes de producción de la industria azucarera, el gobierno brasileño editó el Decreto 19.717, determinando la mezcla obligatoria de, como mínimo, un 5% de bioetanol anhidro en la gasolina. En 1975, bajo los efectos de la primera crisis del petróleo, se creó el Programa Nacional del Alcohol (Proálcool, en portugués), mediante el Decreto 76.593, con metas de producción (3 mil millones de litros de bioetanol en 1980) e incentivos para expandir la producción y el uso de bioetanol combustible, inicialmente aumentado el agregado de bioetanol anhidro a la gasolina. Con el recrudecimiento de la crisis en 1979, el Proálcool se intensificó, y se estimuló el uso de bioetanol hidratado en motores adaptados o específicamente producidos para el empleo de este biocombustible. En tales condiciones, la producción de bioetanol alcanzó los 11,7 mil millones de litros en 1985, valor por encima de la meta pretendida inicialmente.

En síntesis, el conjunto de incentivos adoptados por el Proálcool en esa época, que se mostró efectivamente capaz de motivar los agentes económicos, incluía los puntos siguientes: a) definición de niveles mínimos más elevados en la concentración de

bioetanol anhidro en la gasolina, que fueron progresivamente elevados hasta alcanzar el 25%; b) garantía de un precio al consumidor para el bioetanol hidratado menor que el precio de la gasolina (en esa época los precios de los combustibles, a lo largo de toda la cadena productiva, eran determinados por el gobierno federal); c) garantía de remuneración competitiva para el productor de bioetanol, aun 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 aumentaran su capacidad de producción; e) reducción de los impuestos (en la venta de autos nuevos y en la licencia anual) para los vehículos a bioetanol hidratado; f) establecimiento de la obligatoriedad de venta de bioetanol hidratado en las estaciones de servicio; y g) mantenimiento de existencias estratégicas para asegurar el abastecimiento en la entre zafras.

Con la reducción de los precios del petróleo y la recuperación de los precios del azúcar a partir de 1985, se volvieron a analizar las políticas de fomento al bioetanol, con el estímulo a la fabricación de azúcar para exportación. En este cuadro de dificultades y falta de atención gubernamental para con el bioetanol, el mercado se desorganizó y surgieron discontinuidades en la oferta de producto, lo que llevó a la adopción de 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 del bioetanol.

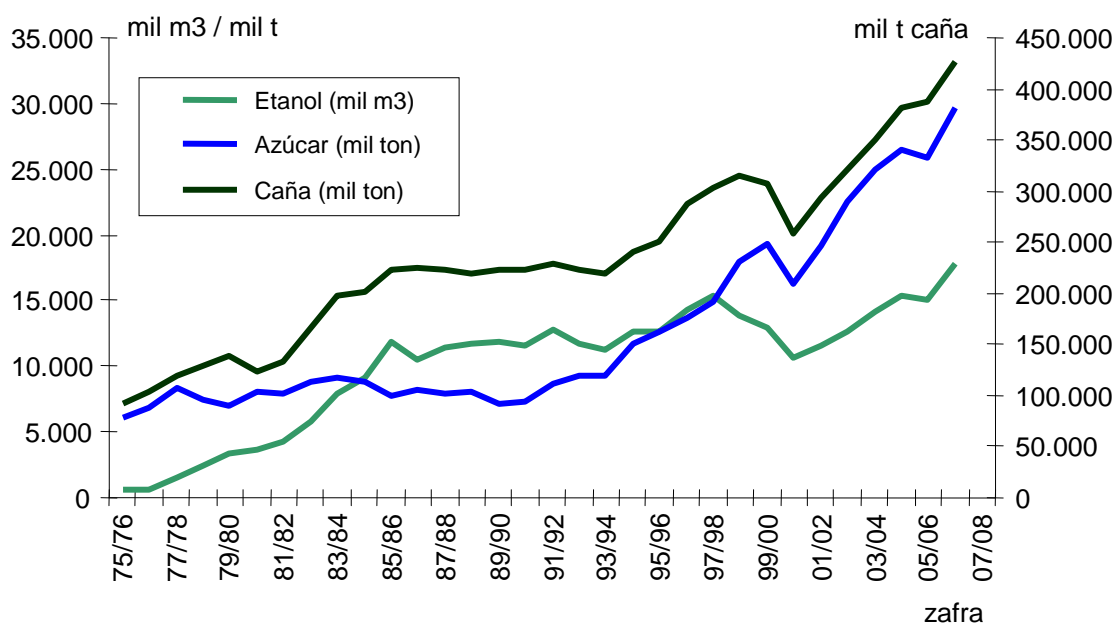
La industria sucroalcoholera en Brasil, así como el mercado de combustibles, que por décadas desarrollaron sus actividades con elevado nivel de intervención gubernamental, con la definición de mercados, cuotas y precios, tuvieron durante los años 90 un proceso de liberalización, con la progresiva retirada de los subsidios y el fin de la fijación de los precios. Como consecuencia, pasó a regir un nuevo modelo de relacionamiento entre productores de caña de azúcar, productores de bioetanol y empresas distribuidoras de combustible, en el cual prevalecieron las reglas de mercado actualmente adoptadas en el país. Del cuadro 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, que buscan mantener en condiciones de mayor o menor paridad para el consumidor el uso de bioetanol hidratado o gasolina.

Actualmente, en la configuración institucional de la agroindustria del bioetanol, se destacan los siguientes órganos: Consejo Nacional de Política Energética (CNPE), cuyas atribuciones incluyen el establecimiento de directrices para los programas de producción y uso de los biocombustibles; la Agencia Nacional de Petróleo, Gas Natural y

Biocombustibles (ANP), responsable por la regulación y fiscalización de las actividades económicas relacionadas al bioetanol y al biodiesel, así como por la implementación de la política nacional de estos productos con énfasis en la garantía de suministro en todo el territorio nacional y en la protección de los intereses del consumidor; y el Consejo Interministerial del Azúcar y del Alcohol (Cima), entidad que delibera sobre las políticas relacionadas con las actividades del sector sucroalcoholero en Brasil.

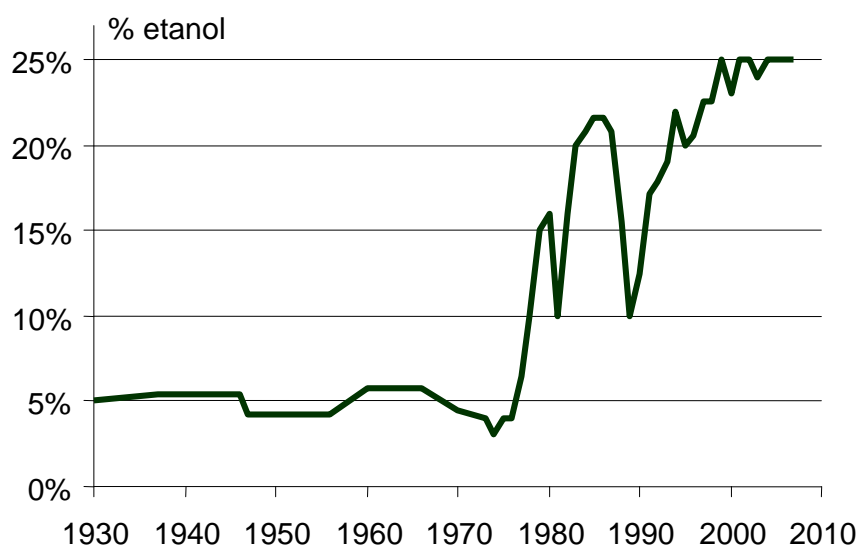
A partir de 2003, con el advenimiento de los coches flexibles y su gran aceptación por parte de los consumidores, se retomó el crecimiento del consumo del bioetanol hidratado en el mercado interno abriendo nuevas perspectivas para la expansión de la agroindustria de la caña en Brasil, que se suman a las posibilidades del mercado internacional de bioetanol anhidro para uso en mezclas con gasolina. Desde entonces, la agroindustria de la caña brasileña se ha expandido a tasas elevadas, como sintetizan los Gráficos 2, 3 y 4, que presentan, respectivamente, la evolución de la producción de caña y bioetanol (anhidro e hidratado) y azúcar, la evolución de la concentración de bioetanol anhidro en la gasolina y el comportamiento de la producción de vehículos a bioetanol hidratado.

[Gráfico 2] Evolución de la producción de caña de azúcar, bioetanol y azúcar en Brasil



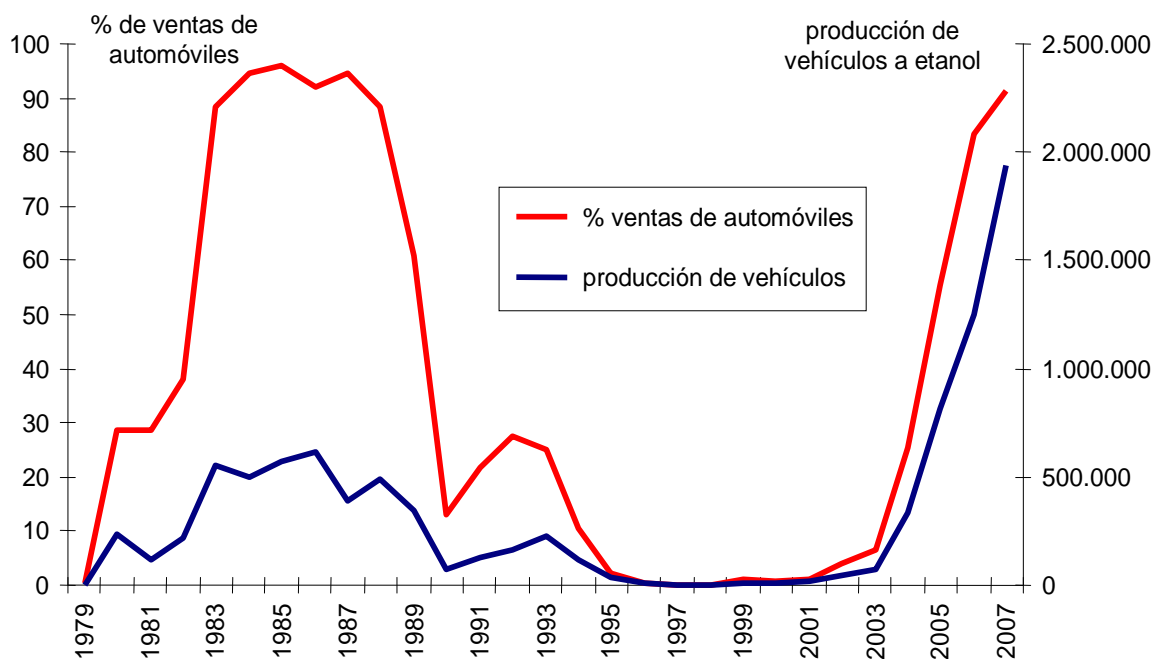
Fuente: Unica (2008).

[Gráfico 3] - Promedio de concentración de bioetanol anhidro en la gasolina brasileña



Fuente: MME (2008).

Gráfico 4 - Evolución de la producción de vehículos a bioetanol hidratado y de su participación en las ventas de vehículos nuevos

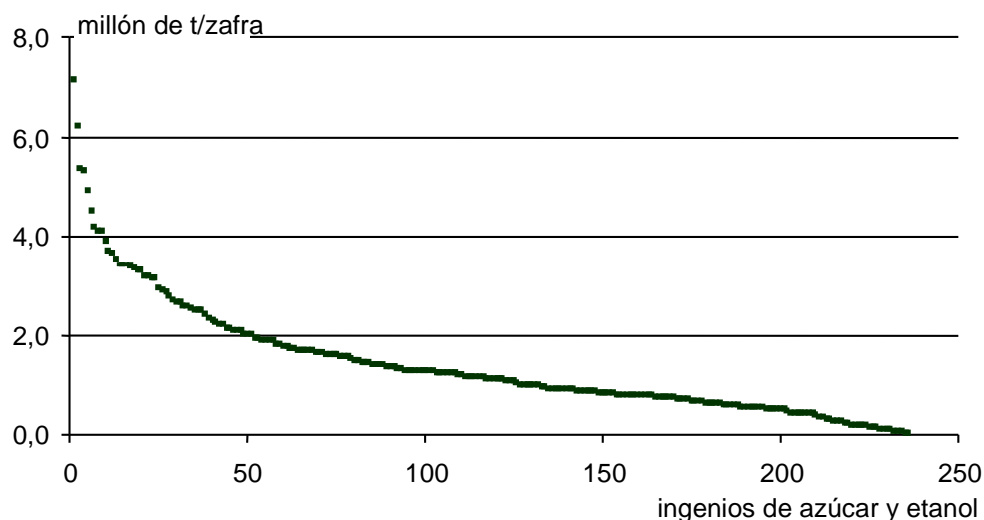


Fuente: Anfavea (2008).

Actualmente la caña ocupa cerca del 9% de la superficie agrícola del país y es el tercer cultivo más importante en superficie ocupada, después de la soya y el maíz. En 2006, el área cosechada fue de 5,4 millones de hectáreas, para un área plantada de más de 6,3 millones de hectáreas y producción total de 425 millones de toneladas. La región productora de mayor destaque es la del Centro Sur Sudeste, que concentra más del 85% de la producción, con cerca del 60% en el Estado de São Paulo.

El sistema de producción involucra más de 330 ingenios, con capacidad entre 600 mil y 7 millones de toneladas de caña procesada por año. Un ingenio promedio tiene una capacidad de molienda de cerca de 1,4 millones de toneladas anuales. La distribución de la capacidad de molienda se presenta en el Gráfico 5 (valores para la zafra 2006/2007). Se puede observar que los diez mayores ingenios responden por un 15% del total de materia prima procesada, mientras que las 182 unidades menores procesan mitad de la caña, indicando una baja concentración económica. Desde el punto de vista del perfil de producción, los ingenios brasileños pueden ser clasificados en tres tipos de instalaciones: los ingenios de azúcar, que producen exclusivamente azúcar; los ingenios de azúcar con destilerías anexas, que producen azúcar y bioetanol; y las instalaciones que producen exclusivamente bioetanol, o destilerías autónomas. La gran mayoría de las instalaciones está formada por ingenios de azúcar con destilerías anexas (cerca del 60% del total), seguidas por una considerable cantidad de destilerías autónomas (cerca del 35%) y por algunas unidades de procesamiento exclusivo de azúcar. Los ingenios brasileños trabajan, en promedio, con el 80% de la caña proveniente de tierras propias y arrendadas o de accionistas y compañías agrícolas con alguna vinculación a las usinas. El 20% restante es suministrado por cerca de 60 mil productores independientes, la mayoría utilizando menos de dos módulos agrícolas.

Gráfico 5 - Distribución de la capacidad anual de procesamiento de los ingenios de azúcar y bioetanol en Brasil



Fuente: Elaborado en base al Idea (2007).

De acuerdo con números de la zafra 2006/2007, el agronegocio de la caña de azúcar, que engloba la producción de caña, azúcar y bioetanol, movió en 2007 cerca de R\$ 41 mil millones, correspondientes a facturación directa e indirecta. Se produjeron 30 millones de toneladas de azúcar y 17,5 mil millones de litros de bioetanol, y se exportaron 19 millones de toneladas de azúcar (US\$ 7 mil millones) y 3 mil millones de litros de bioetanol (US\$ 1,5 mil millones), representando un 2,65% del Producto Interno Bruto (PIB). Además de ello, se recaudaron R\$ 12 mil millones en impuestos y tasas, y se realizaron inversiones anuales de R\$ 5 mil millones en nuevas unidades agroindustriales. Asociada a la expansión de la producción sucroalcoholera, ha tenido lugar una significativa diversificación de la composición y del origen del capital invertido en la agroindustria, originalmente casi todo basado en empresas familiares.

Es importante observar que la expansión de la producción de bioetanol y azúcar en las últimas décadas ocurrió no sólo con el aumento del área cultivada, sino también con expresivas ganancias de productividad en las fases agrícola e industrial, que presentaron incrementos anuales acumulados del 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, a lo largo de 32 años. Gracias a estas ganancias de productividad, el área actualmente dedicada al cultivo de la caña para la producción de bioetanol, cerca de 3,5 millones de hectáreas, y un 38% del área que sería requerida considerando la producción actual y la productividad agroindustrial observada en el

inicio del Proálcool, en 1975. Esta notable ganancia de productividad, multiplicando por 2,6 el volumen de bioetanol producido por área cultivada, se consiguió esencialmente mediante la continua incorporación de nuevas tecnologías. Como consecuencia directa de la evolución de la productividad, se observó una progresiva reducción de los costos, configurando un proceso de aprendizaje y consolidación similar al presentado por otras tecnologías energéticas innovadoras.

En la promoción del desarrollo tecnológico, fue y es importante la existencia de instituciones públicas, federales y estatales, así como empresas privadas volcadas al agregado de conocimiento a la cadena productiva del bioetanol de caña de azúcar, en particular en la etapa agrícola. Este proceso involucra mejoramiento genético, mecanización agrícola, gestión de los recursos, control biológico de plagas, reciclaje de efluentes y prácticas agrícolas conservacionistas de mayor desempeño, presentando resultados efectivos y con perspectivas promisorias de ganancias adicionales de eficiencia en los sistemas de producción.

La sostenibilidad del bioetanol de caña de azúcar: la experiencia brasileña

En una acepción amplia, de un modo cada vez más decisivo, se impone que los sistemas energéticos sean no sólo conceptualmente renovables, sino también efectivamente sostenibles. Sin embargo, determinar la sostenibilidad de un sistema energético no es una tarea simple, pues depende no sólo del vector energético, sino fundamentalmente, del contexto de su producción y utilización, con procedimientos y métodos por consolidar. No obstante, aunque el debate sobre la sostenibilidad de las bioenergías esté en curso y, con frecuencia, se polarice entre visiones utilitaristas y preservacionistas, el aprovechamiento de la producción vegetal por parte de las sociedades humanas ha sido practicada desde hace milenios mediante la agricultura en los más diferentes ecosistemas y debe ser considerado una alternativa energética a conocer mejor y a ser promovida en los contextos en que se muestre adecuada.

En este sentido, este capítulo presenta 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 disminución sensible de los recursos que le dan origen, como la biodiversidad, la fertilidad del suelo y los recursos hídricos. Tal enfoque se basa en una de las definiciones clásicas de sostenibilidad: "condición en que la producción puede mantenerse indefinidamente sin degradar las existencias de capital, incluyendo las existencias de capital natural", considerando sus

tres pilares – ambiental, social y económico – y evaluando la producción de bioetanol de caña de azúcar como se practica en Brasil.

Considerando los temas más relevantes asociados a los impactos ambientales en la producción de caña y bioetanol, con base en diversos estudios de campo, es posible mostrar cómo la agroindustria de la caña de azúcar en Brasil viene evolucionando positivamente. Las emisiones de efecto global (gases de efecto invernadero) se ven efectivamente mitigadas por la producción y uso del bioetanol y del bagazo, sustituyendo combustibles fósiles, mientras que las emisiones de carácter local, especialmente asociadas a la quema precosecha de la caña, viene reduciéndose por la adopción de la cosecha mecanizada de la caña cruda, en cumplimiento a los protocolos firmados entre la agroindustria y el gobierno.

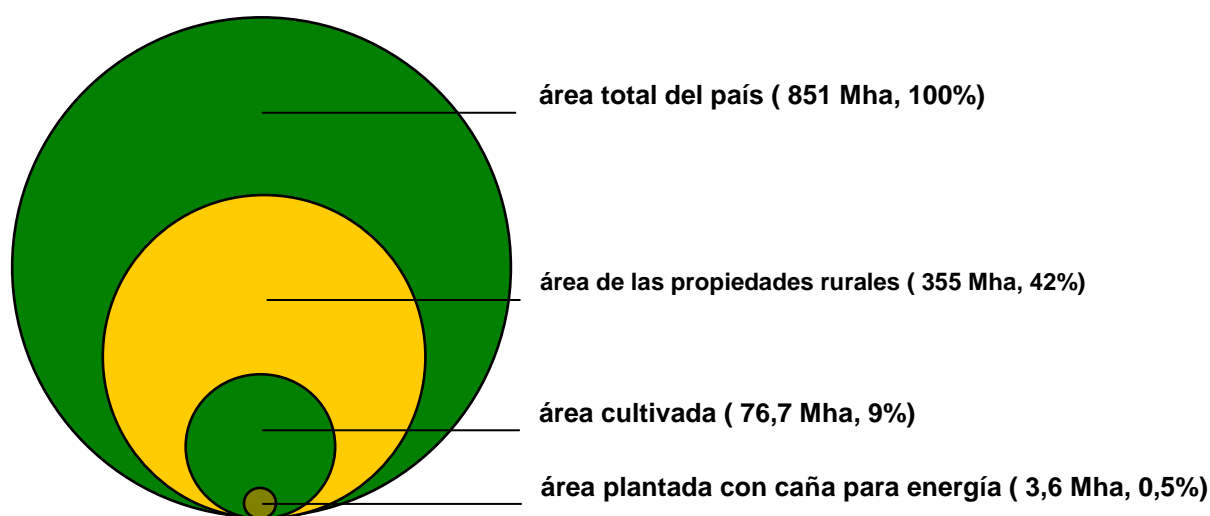
Desde el punto de vista de los recursos hídricos, se constata una reducción notable de la captación de agua y lanzamiento de efluentes, superior al 60%, alcanzada mediante la racionalización del uso y la adopción de técnicas de reutilización, mientras que la disposición final de la vinaza en sistemas de fertirrigación permitió aumentar la productividad agrícola y reducir el empleo de fertilizantes. En cuanto al uso de fertilizantes y defensivos agrícolas, se demostró cómo la caña de azúcar, comparada con otros cultivos de importancia, demanda menor aporte de agroquímicos, sea por el mayor reciclaje de nutrientes, sea por la amplia adopción de métodos biológicos de control de plagas.

La reducción de la erosión y la protección de la fertilidad del suelo se ven naturalmente favorecidas por el hecho de la caña ser un cultivo semiperenne, pero también se han estado promoviendo mediante técnicas agrícolas adecuadas. De la misma manera, la biodiversidad ha sido objeto de mayor atención en la agroindustria, por la protección de las áreas de preservación permanente y por la renovación y diversificación de la base de germoplasma en exploración. Es importante observar que la efectiva aplicación de la legislación y la difusión de una postura más favorable al ambiente natural derivan y dependen de la presencia clara y activa del Estado, que tienen la misión de implementar y fiscalizar el cumplimiento de la legislación ambiental.

Como temas ambientales recientes y aún poco discutidos, se analizan la emisión de gases de efecto invernadero asociada al cambio del estándar de uso del suelo, con la pérdida de su cobertura original, al momento de la implantación de los cañaverales, y el proceso indirecto de deforestación causado por la ocupación de las áreas de pastura por la caña. En el caso del bioetanol en Brasil, es poco probable que puedan ser asociadas pérdidas de cobertura forestal a la producción de bioetanol, ya que la

expansión de la plantación de caña ha estado ocurriendo básicamente en áreas antes ocupadas por pasturas de baja productividad o cultivos anuales destinados, en gran parte, a la exportación, como la soya, casos en que el sistema radicular y la biomasa sobre el suelo son, generalmente, de menor magnitud que en el caso de la caña. Con referencia a la deforestación indirectamente inducido por la expansión del cultivo de la caña de azúcar, cabe comentar que Brasil, así como diversos otros países situados en la región tropical húmeda del planeta, posee tierras disponibles para una expresiva expansión de la producción agrícola, pudiendo producir de forma sostenible alimentos y bioenergía sin tener que renunciar a su patrimonio forestal. Los cañaverales destinados a la producción de combustibles, en Brasil, corresponden a una reducida parte del área agrícola y del territorio del país, como se muestra en la Figura 3. Efectivamente, la producción de bioetanol de caña de azúcar no implica deforestación, cuya compleja problemática impone el ordenamiento de la expansión de las actividades agropecuarias en la región amazónica y el refuerzo de las medidas de fiscalización y ejecución legal.

Figura 3 - Uso de la tierra en Brasil



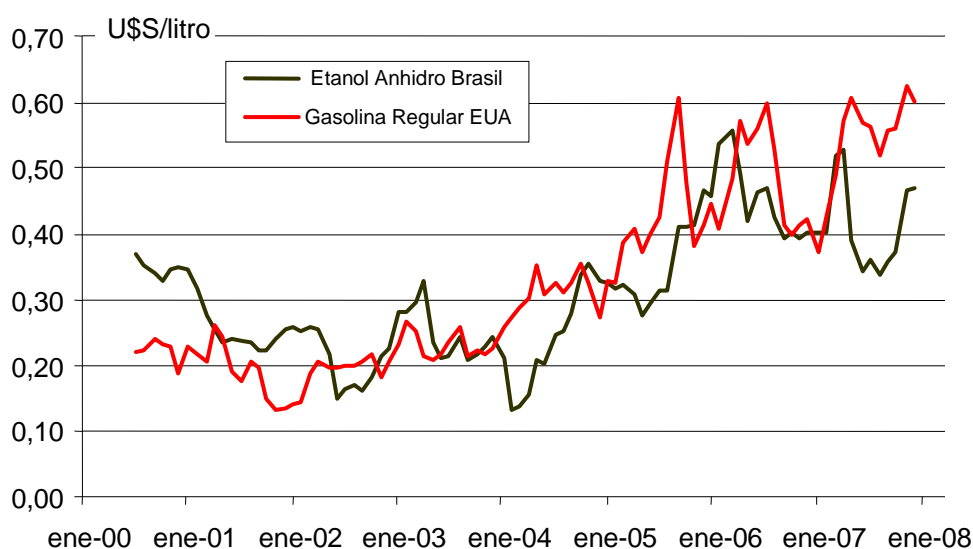
Fuente: IBGE (2007).

Un instrumento importante para el ordenamiento de la expansión de la agroindustria del bioetanol en Brasil, el Zoneamiento Agroecológico de la Caña de Azúcar, desarrollado por el gobierno federal en caso a las informaciones de mapas de suelo, de clima, de áreas de reserva ambiental, geomorfológicos y topográficos, establece las áreas aptas y las regiones para las cuales no se recomienda este cultivo en gran

escala. Por ello, este trabajo puede ser utilizado como instrumento orientador de políticas de financiamiento, inversiones en infraestructura y perfeccionamiento del marco tributario, así como debe servir para eventuales certificaciones socioambientales que se establezcan. Según este levantamiento, el área disponible y con aptitud para el cultivo de la caña, sin considerar el uso de la irrigación, supera los 110 millones de hectáreas.

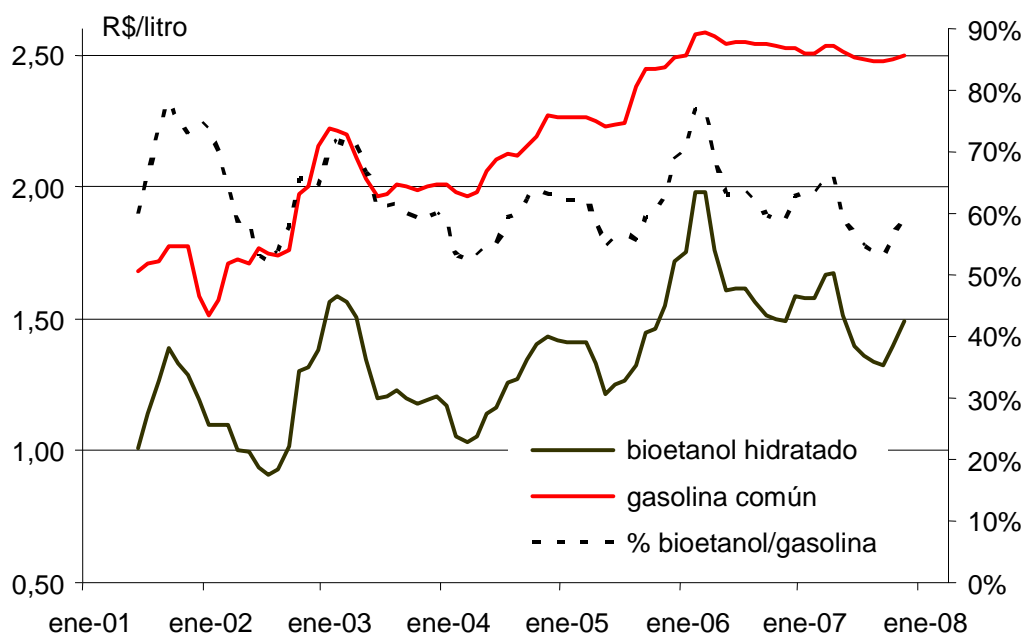
Con referencia a la sostenibilidad económica del bioetanol de caña de azúcar, como se sintetiza en los Gráficos 6 y 7, el bioetanol se muestra competitivo frente a los combustibles convencionales en términos de precios internacionales al productor (ex-tributos) en los mercados libres, así como en los precios finales para el consumidor, en las condiciones practicadas en Brasil.

[Gráfico 6] - Evolución de precios pagos al productor de gasolina en los EEUU y de bioetanol de caña de azúcar en Brasil, sin tributos



Fuente: Cepal (2008).

Gráfico 7 - Evolución de los precios promedio al consumidor del bioetanol hidratado y de la gasolina común y de la relación entre estos precios en Brasil



Fuente: ANP (2008).

Considerando los costos de producción – materia prima, operación, mantenimiento e inversión -, el costo final del bioetanol de caña de azúcar se sitúa entre los US\$ 0,35 y US\$ 0,40 por litro de bioetanol, valores correspondientes al petróleo entre US\$ 50 y US\$ 57 por barril equivalente, con valores significativamente inferiores a los del mercado de este combustible fósil. Es probable que, en los ingenios en implantación en las nuevas fronteras productoras, los costos del bioetanol sean inferiores, teniendo en cuenta la localización de estas usinas, con cañaverales más densos (menores costos de transporte), así como el hecho que se las dedica sólo a la producción de biocombustible, lo que reduce los costos de materia prima y las inversiones. Por otra parte, considerando los ingenios más antiguos y completamente amortizados, el bioetanol podrá también presentar menores costos de orden financiero, 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 un modo general. Otra consideración importante se refiere al impacto de la tasa de cambio adoptada, pues la expresiva valorización de la moneda brasileña en años recientes ha elevado bastante el valor de los productos de la agroindustria sucroalcoholera, cuando se los evalúa en divisas.

Si se toman en cuenta las posibilidades de continuidad en el proceso de incremento de la productividad agrícola e industrial, es razonable esperar que los costos de producción del bioetanol de caña de azúcar permanezcan estables o se reduzcan en términos relativos, no obstante, junto con los combustibles fósiles, se esperan escenarios en los cuáles los precios elevados se mantengan, sin perspectivas de reducción a los niveles practicados hace algunas décadas. Por lo tanto, del punto de vista económico, la producción de bioetanol de caña de azúcar se presenta sostenible, con precios y costos efectivamente viables, sin necesidad de subsidios, desde ya, para competir con los combustibles convencionales.

Para concluir el análisis de sostenibilidad de la producción de bioetanol de caña de azúcar, desde el punto de vista de las implicaciones sociales, es oportuno demostrar la relevancia de la generación de empleos y renta en esta agroindustria. En 2005, había 982 mil trabajadores directa y formalmente involucrados con la producción sucroalcoholera. Se estimaba para ese mismo año un total de 4,1 millones de personas trabajando de algún modo dependientes de la actividad de la agroindustria de la caña. En lo tocante a la calidad de los empleos, basados en datos de la Encuesta Nacional por Muestra de Domicilios (PNAD) y adoptando como variables el nivel educacional de los empleados, el grado de formalidad del empleo, los rendimientos recibidos en el trabajo principal y los auxilios recibidos por los empleados, se definieron índices cuantitativos que permiten establecer una evaluación objetiva de las condiciones de trabajo e indican mejoras importantes en diversos indicadores socioeconómicos para los trabajadores en la plantación de caña de azúcar en Brasil en los últimos años, como ganancias reales de salarios, aumento y diversificación de los beneficios recibidos por parte de los trabajadores, reducción expresiva del trabajo infantil y aumento de la escolaridad.

A pesar de estas mejoras, el trabajo en la producción de bioetanol, especialmente en las actividades manuales en el campo, es generalmente pesado y le compete al Estado la fiscalización permanente del estricto cumplimiento de la legislación laboral, factor esencial para cohibir las distorsiones existentes y promover el progreso de las relaciones de trabajo en ese sector.

La creación de oportunidades de trabajo y la distribución entre trabajadores del valor agregado en la cadena productiva son dos de las características más importantes de la bioenergía y, en particular, del bioetanol de caña de azúcar, constituyendo un diferencial relevante entre esa tecnología energética y sus congéneres. Aun con la progresiva adopción de tecnologías de alta productividad, como la cosecha mecanizada, la producción de bioetanol continua siendo una generadora de empleos,

cada vez de mayor calidad, con la correspondiente elevación de los requisitos de capacitación y de la remuneración promedio. Del mismo modo, cabe reconocer el papel relevante de la actividad agroindustrial como generadora de renta y dinamizadora de la actividad económica local y regional, con beneficios indirectos significativos. En base a un análisis desarrollado con ayuda de una matriz de relaciones intersectorial (insumo-producto), ajustada para 2002, se estimó que, para cada millón de metros cúbicos de bioetanol adicionales de capacidad anual de producción, se agregan R\$ 119 millones por año debido a las inversiones. Durante la operación deben generarse además anualmente cerca de R\$ 1,46 mil millones, computados los efectos directos, indirectos e inducidos.

Como una forma de asegurar el cumplimiento de los criterios de sostenibilidad en la producción de biocombustibles, se propusieron –principalmente por iniciativas de países industrializados- diversos sistemas de certificación apuntando explícitamente a asegurar que la producción y la distribución tengan lugar de un modo sostenible. Se cree que, diseñados en forma adecuada y bien implementados, estos sistemas de información podrán servir como instrumentos para que la producción de los biocombustibles se desarrolle en un marco deseable de racionalidad, como se demostró que el bioetanol de caña de azúcar puede atender competitivamente.

Perspectivas para un mercado mundial de biocombustibles

La existencia de países con buenas condiciones para la producción sostenible de bioetanol y la necesidad mundial de un combustible renovable y ambientalmente adecuado indican perspectivas interesantes para que este biocombustible sea un producto global. Para ello, es interesante caracterizar el potencial bioenergético, que depende de escenarios geográficos, económicos y políticos dinámicos y tecnologías de producción y conversión, algunas aun en desarrollo.

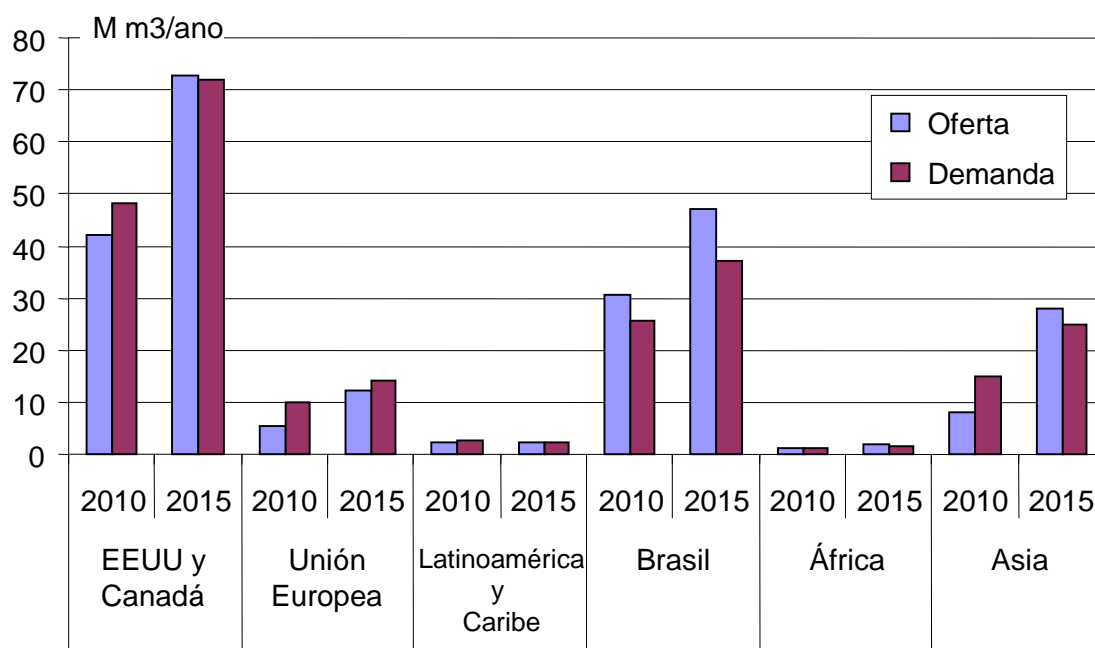
Utilizando metodologías que toman en cuenta la base de recursos naturales disponible y las proyecciones de demanda de bienes agrícolas, se estima que la contribución potencial de la biomasa para el futuro de la oferta global de energía podrá variar de cerca de 100 EJ/año a 400 EJ/año, en 2050, lo que significa de 21% a 85% del actual consumo total de energía en el planeta, estimado en 470 EJ. En otros estudios, detallados por tipo de recurso y región, se constata que el mayor potencial para la producción de cultivos energéticos se encuentra en el África Subsahariana y en Latinoamérica y el Caribe, que alcanzan, en el escenario con mayor eficiencia en la alimentación animal, producciones anuales de 317 EJ y 281 EJ, respectivamente.

Un informe de la Agencia Internacional de Energía apunta como realista la expectativa de que la actual contribución de la bioenergía, entre 40 EJ y 55 EJ por año, aumentará considerablemente, siendo esperado ya en este siglo un aporte anual entre 200 EJ y 400 EJ. Este informe observa que un tercio de esta energía podría ser suministrado por residuos, un cuarto por la regeneración de tierras degradadas o marginales y el restante por tierras propicias para la agricultura, y sobre todo, pasturas actuales.

Con referencia al mercado para el bioetanol, se proyecta para el 2010 una demanda global de 101 mil millones de litros, frente a una oferta estimada en 88 mil millones de litros, cuadro que tiende al equilibrio en 2015, cuando la oferta deberá situarse cerca de los 162 mil millones de litros, para una demanda en el nivel de los 150 mil millones de litros, distribuyéndose entre las regiones de modo heterogéneo, de acuerdo con lo mostrado en el Gráfico 8.

Como condición fundamental para que se desarrollen en los próximos años los potenciales de producción y, consecuentemente, el mercado global de bioetanol, se han propuesto e implementado en diversos países políticas volcadas a la promoción de los biocombustibles, con un grado variable de claridad y objetividad. Un análisis de estas políticas muestra que el aumento de la seguridad energética y la mitigación de cambios climáticos están entre los más importantes factores de motivación para programas bioenergéticos en la mayoría de los países. Los temas ambientales están más presentes en los países industrializados, mientras que la promoción del desarrollo rural es un objetivo relevante para los demás países, propósito casi siempre alineado a una agenda de combate a la pobreza. Todos los países destacan en sus políticas diversos objetivos centrales y antagónicos, lo que puede volver el desarrollo de la bioenergía una tarea difícil, eventualmente además de las posibilidades de una transición de bases energéticas, que por sí sólo se configura compleja. De todos modos, es positiva la clara inserción de la bioenergía en la agenda de las políticas públicas.

Gráfico 8 - Estimativas de oferta y demanda de bioetanol combustible para 2010 y 2015



Fuente: Elaboración de Luiz Augusto Horta Nogueira.

Con relación al desarrollo de un mercado global para los biocombustibles, es esencial entender las interacciones entre los mercados de alimentos y la producción bioenergética. Particularmente en lo que atañe a la disponibilidad de recursos para la producción de alimentos, se constata que la utilización de tierras agrícolas para producción de materias primas de interés energético es casi despreciable 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 ser aumentada para un 3% a 4% en 2030. 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, decididamente, no es una crisis de insuficiencia en la producción de alimentos. La producción mundial de alimentos ha estado creciendo en forma sistemática y su oferta por persona aumentó un 24% en los últimos 40 años, pasando de 2.360 para 2.803 calorías diarias per cápita, mientras que la población evolucionó de tres para seis mil millones de personas.

A pesar de ello, es importante reconocer que los impactos de los biocombustibles están claramente diferenciados de acuerdo con su origen. La producción de

biocombustibles mediante vías tecnológicas de baja productividad en los contextos norteamericano y europeo presenta límites evidentes, directamente relacionados con la producción de alimentos, involucrando el aprovechamiento de nichos de producción, especialmente en casos de excedentes agrícolas, que pueden representar un pequeño porcentaje del consumo interno de combustibles líquidos en estos países. Tal realidad abre una ventana de oportunidad para la producción racional y sostenible de biocombustibles en el contexto de países tropicales húmedos de Latinoamérica y el Caribe, África y Asia, que gradualmente podría permitir a los países de alto consumo energético alcanzar tasas de sustitución mucho más elevadas, del 20% al 30%, sin afectar de forma relevante la producción de otros bienes agrícolas y con un considerable potencial de desarrollo en esas regiones.

El efecto de la producción de biocombustibles sobre la demanda de productos agrícolas se ve 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 tarifarias que dificultan o impiden el acceso de productos agrícolas oriundos de los países en desarrollo a los mercados de los países industrializados, desestimulando la producción para exportación. Por otro lado (y peor), los excedentes de la producción subsidiada desequilibran de un modo perverso el mercado mundial de bienes agrícolas, lo que causa la desvalorización de los precios internacionales y desestructura la producción de alimentos en la mayoría de los países de menor renta.

La base de recursos naturales disponibles en el planeta es ampliamente suficiente para la producción bioenergética sostenible en volúmenes razonables, con reducido impacto en otras actividades, siempre que se adopten vías tecnológicas racionales, como el bioetanol de caña de azúcar, que por sus indicadores diferenciados de productividad, difícilmente puede asociarse a una crisis de oferta y de precios de los alimentos. Además de ello, la adopción de tecnologías más eficientes, que reduzcan pérdidas y racionalicen los sistemas productivos agropecuarios, posiblemente serán más importantes aun que la larga disponibilidad de recursos naturales como factor mitigante de la disputa entre producción de alimentos y bioenergía (y otros productos agrícolas no alimentarios) por tierras y demás recursos productivos.

Con el propósito de dar más consistencia a la discusión sobre los nexos entre la producción de biocombustibles y la disponibilidad de alimentos, así como caracterizar correlaciones entre los precios de los diferentes productos, se evaluó la evolución de los precios internacionales para diferentes categorías de productos agrícolas entre

marzo de 1990 y marzo de 2008, agregados según su relación directa, indirecta o no relevante con la producción de biocombustibles. Aunque se haya determinado que hay una correlación clara entre los precios del petróleo y los de los productos agrícolas relacionados con los biocombustibles, en el caso del azúcar, asociado a la caña de azúcar, tal correlación es bastante menor. Este dato confirma el reducido nexo entre el bioetanol de caña de azúcar y la elevación de los precios de los alimentos.

Existen buenos motivos para fomentar, con criterios de sostenibilidad, un mercado de bioetanol, que van más allá de la posibilidad de que los países productores y consumidores de este biocombustible puedan cumplir los objetivos de los acuerdos ambientales internacionales. En este sentido, las estrategias nacionales deben atender adecuadamente sus perspectivas de desarrollo y las demandas energéticas, agricultura y comercio, lo que implica considerar la entrada en un futuro mercado internacional de bioetanol o priorizar el producto nacional para el desarrollo rural y para el suministro de energía para uso doméstico. En cualquier caso, en la proposición de programas consistentes para la producción y uso de bioetanol, en países donde esta tecnología energética aun es incipiente, es imperativo que se realicen evaluaciones y estudios previos, para establecer metas coherentes a base de recursos existentes.

Es muy probable que un mercado global para el bioetanol sea una realidad en pocos años. Sin embargo, su magnitud y su amplitud entre los países dependerán de diversos elementos que aún se están delineando, tales como las políticas de los países con relación a sus mercados internos, discusiones sobre criterios de sostenibilidad, negociaciones de comercio internacional y reacción de la sociedad civil en los países en desarrollo y en los países industrializados, componiendo un cuadro dinámico y en definición.

Una visión del futuro para el bioetanol combustible

La bioenergía representa una de las mejores alternativas para captar y almacenar la energía solar, uno de los pocos recursos naturales subutilizados por la humanidad, siempre que se disponga de tierras libres, clima adecuado (luz, agua y temperatura) y, en la misma importancia, conocimiento suficiente y disposición emprendedora para aplicarlo. Especialmente apta para el suministro de combustibles automotrices, la energía solar en la forma de bioetanol, producido con eficiencia y sostenibilidad, es capaz de atender las demandas urgentes para la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, mejorar la calidad del aire en las metrópolis y competir en

precio con las energías convencionales. Además de ello, esta vía puede proporcionar una nueva dinámica agroindustrial para los países tropicales con disponibilidad de tierras y disposición para superar esquemas energéticos concentrados y ambientalmente problemáticos, capaz de otorgar seguridad energética y traer nuevas perspectivas de crecimiento económico.

La experiencia brasileña en este campo puede y debe ser una referencia para otros países y contextos similares. Son muchos los países en condiciones de promover la producción y el uso del bioetanol de caña de azúcar, adaptando el ejemplo de Brasil a sus características, potenciales y mercados. Estos países, no obstante, carecen todavía de estudios y evaluaciones más detalladas, para una adecuada formulación e implantación de programas nacionales, con eficiencia y consistencia. De igual manera, diversos países han estado buscando reducir su dependencia energética, disminuir sus emisiones de carbono y mejorar la calidad del aire de sus ciudades, pero de un modo general, todavía no incluyen el uso de bioetanol de caña de azúcar entre sus alternativas, erigiendo barreras que protegen vías poco eficientes y no sostenibles.

Constatados concretamente y bien documentados en base a la experiencia de décadas en Brasil, se pueden destacar los siguientes puntos que configuran el bioetanol de caña de azúcar como una opción energética estratégica y sostenible, pasible de ser replicada y adaptada en otros países con disponibilidad de tierras y condiciones edafoclimáticas adecuadas:

1. **El bioetanol se puede utilizar en motores vehiculares, puro o en mezclas con gasolina, con buen desempeño** y empleando esencialmente el mismo sistema de distribución y almacenaje existente para la gasolina. En concentraciones de hasta un 10%, los efectos del bioetanol son casi imperceptibles sobre el consumo de los vehículos, que 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. Mediante esa vía productiva, se puede alcanzar cerca de ocho mil litros por hectárea y una significativa disponibilidad de excedentes de interés energético, como biocombustibles sólidos (bagazo y paja) y, principalmente, bioelectricidad.

3. **El bioetanol de caña de azúcar, producción en las condiciones brasileñas, se muestra competitivo con el petróleo alrededor de US\$ 50 el barril**, con un costo de producción determinado principalmente por la materia prima. La tecnología empleada para su producción está abierta y disponible, pudiendo ser, progresivamente, introducida en la agroindustria de la caña volcada a la fabricación de azúcar.
4. **Los impactos ambientales de carácter local asociados a la producción de bioetanol de caña de azúcar** sobre los recursos hídricos, el suelo y la biodiversidad, y derivados del uso de agroquímicos, entre otros, **pueden ser, y en buena medida fueron efectivamente atenuados a niveles tolerables**, inferiores a la mayoría de otros cultivos agrícolas.
5. **El uso del etanol de caña de azúcar permite reducir en casi 90% las emisiones de gases de efecto invernadero**, contribuyendo de modo efectivo para mitigar el cambio climático. En las condiciones actuales, para cada millón de metros cúbicos de bioetanol de caña de azúcar empleado en mezcla con gasolina, cerca de 1,9 millón de toneladas de CO₂ dejan de ser emitidos para la atmósfera.
6. **Son significativas las perspectivas de desarrollo tecnológico en la agroindustria del bioetanol de caña de azúcar**, con aumento de la productividad y del desempeño energético y diversificación de la gama de productos, con destaque para las vías de hidrólisis y gasificación, de interés en el incremento de la producción de bioetanol y bioelectricidad.
7. **Los empleos en la agroindustria del bioetanol de caña de azúcar presentan buenos indicadores de calidad** y, aun cuando la creciente mecanización en la cosecha de la caña de azúcar reduzca el trabajo braza, la demanda de mano de obra permanece bastante elevada por unidad de energía producida, en comparación con otras fuentes energéticas.
8. **La producción de bioetanol de caña de azúcar, como se desarrolla en Brasil y otros países con suficiente disponibilidad de tierras, poco afecta la producción de alimentos**, ocupando un área muy reducida con relación al área cultivada para alimentos y a las áreas disponibles para la expansión de las actividades agrícolas en general.
9. **La agroindustria del bioetanol de caña de azúcar se articula con muchos sectores de la economía y promueve el desarrollo de diversas áreas**,

como la prestación de servicios, la industria de equipos agrícolas e industriales y la logística.

10. **Son amplias las posibilidades de expandir la producción de bioetanol de caña de azúcar**, no sólo en Brasil, sino también en otros países tropicales húmedos, considerando la disponibilidad de tierras ociosas o utilizadas con actividades pecuarias de baja productividad y la existencia de clima adecuado.

La agroindustria de la caña de azúcar todavía presenta grandes posibilidades de diversificación de sus productos e incremento de las disponibilidades energéticas, sea caminando en dirección a las biorrefinerías, complejos productivos capaces de suministrar bioenergía y biomateriales diversos, sea reforzando la base de recursos energéticos, inclusive con estudios a nivel de proceso fotosintético. La agroindustria de la caña de azúcar está sólo empezando a mostrar sus posibilidades.

Hay ciertamente mucho que hacer y desafíos por superar para la expansión de los sistemas bioenergéticos, pero los beneficios serán proporcionales, en la medida en que un desarrollo energético saludable y consistente es determinante para consolidar una nueva relación entre la naturaleza y la sociedad. Es con fundamento en este punto de vista que la producción y el uso del bioetanol de caña de azúcar ofrecen la perspectiva concreta de una realidad energética más sostenible y hacen de esta agroindustria la palanca de deseables transformaciones sociales y económicas. El modelo brasileño, perfeccionado por décadas y con posibilidades de expandirse con productividad y eficiencia, está a disposición de los países que buscan 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, podrán replicar con éxito la producción eficiente de biocombustibles, para uso y beneficio de todos.