



BIOCOMBUSTIBLES, 2008

Francisco García Olmedo

Real Academia de Ingeniería y Colegio Libre de Eméritos

En los últimos meses se está produciendo una encendida controversia respecto al futuro de los biocombustibles, en la que se han involucrado, entre otros, instituciones internacionales, representantes de los intereses petrolíferos, militantes ecologistas, responsables políticos y defensores de la nueva tecnología. En esta controversia se ha generado una considerable confusión ante la avalancha de réplicas y contrarréplicas, estudios serios y documentos de parte, por lo que puede resultar útil una síntesis aclaratoria de lo que dicen y opinan las fuentes especializadas más fiables.

INICIATIVAS POLÍTICAS

En Estados Unidos, uno de los principales objetivos de la *Advanced Energy Initiative* consiste en sustituir para el año 2025 tres cuartas partes de las importaciones de petróleo por bioenergía renovable, y El Consejo Europeo fijó en 2007 el objetivo obligatorio de un 20% para la proporción que deben representar las energías limpias en el año 2020. En 2008, la Comisión Europea ha propuesto una nueva Directiva¹ para promover las energías renovables que incluye, entre otros, los siguientes objetivos obligatorios para 2020: una tasa global de adopción de energías renovables del 20 %, con un 10 % de biocarburantes dedicados al transporte, y tasas nacionales obligatorias en consonancia con la obligación global del 20 %. Además, la directiva estipula que los biocarburantes usados deben ahorrar al menos el 35 % del CO₂ emitido y prohíbe que las materias primas para fabricarlos procedan de suelos que almacenen mucho carbono o posean alta biodiversidad. Distintos institutos del *Joint Research Center* de la Comisión Europea, dedicados a la energía, el

medio ambiente y la sostenibilidad, y la prospectiva técnica, han concertado reuniones y generado valiosos documentos en relación con la mencionada propuesta de directiva. Tanto la iniciativa norteamericana como la propuesta de directiva europea adolecen de serias inconsistencias e incertidumbres que merece la pena examinar.

En 2007, el presidente de EEUU propuso como objetivos la producción de 130.000 millones de litros de alcohol para el 2017 (15% de la demanda de gasolina estimada para ese año) y de 230.000 millones de litro para el año 2030. En el periodo 2003-2007, la producción global de alcohol (etanol) se duplicó hasta alcanzar los 50.000 millones de litros, y la de biodiesel se quintuplicó, alcanzando los 9.000 millones de litros, lo que en conjunto representó menos del 1 % de las necesidades globales de combustible para el transporte, pero la mera ampliación de dicha cobertura hasta el 2-3 % representa un reto imposible con las tecnologías actuales.

Los biocombustibles se han puesto de actualidad en la crisis de la energía fósil, y tanto los políticos como los medios de comunicación se han referido a ellos como si fueran una panacea que nos salvaría de todo mal, fuera la carestía del petróleo, la vulnerabilidad del suministro de éste o las amenazas del calentamiento global. Sin embargo, en pocos meses se ha pasado a hacerlos responsables del encarecimiento de los alimentos y a calificarlos como amenazas para el medio ambiente. Ni tanto ni tampoco. Sus principales ventajas son sin duda las de ser renovables, producirse de forma descentralizada, mejorar potencialmente la balanza de pagos y, en el marco europeo, dar posible utilidad al suelo laborable que progresivamente se está dejando baldío, así como generar empleo agrícola, evitando que los

agricultores abandonen en masa su profesión, aunque no está claro si en Bruselas esperan depender más de la compra fuera de la UE que de la producción propia.

NO SE TRATA DE VOLVER AL PASADO

La biomasa ha sido la principal fuente de energía a lo largo de la historia de la humanidad hasta bien entrado el siglo XX, e incluso hoy, a escala global, el 10% de la energía que consumimos procede de la biomasa, por lo que esta fuente supera en importancia a cualquier otra renovable, así como a la energía nuclear.

Las plantas pueden considerarse como artefactos capaces de convertir energía luminosa en energía química y de fijar (secuestrar) anhídrido carbónico (CO₂) en forma de biomasa orgánica. De esta biomasa se derivan de forma directa o indirecta los alimentos de todas las especies animales, incluida la humana. Como tales convertidores energéticos, las plantas no son particularmente eficientes, ya que no logran coleccionar anualmente más de 1-2 vatios de energía por metro cuadrado de la superficie terrestre. Así por ejemplo, un sistema vegetal comparativamente eficiente, como la caña de azúcar, no almacena a lo largo del año más del 1% de la energía de la luz incidente, y la planta perenne *Miscanthus gigantea*, una poacea que puede alcanzar los cuatro metros de altura y que actualmente se somete a evaluación experimental como posible fuente bioenergética, no permite cosechar en forma de biomasa más del 2% de la energía luminosa incidente, supuesto que se cultive en suelos óptimos, bajo pluviosidades (sin irrigación) y temperaturas

medias apropiadas, como ocurre en el medio oeste americano. Sin embargo, en comparación con las pilas solares, esta ineficiencia se ve compensada por sus bajos costes, ya que bastan cantidades moderadas de agua y nutrientes para que las plantas se fabriquen a sí mismas, y, en contraste con la energía fósil, la ventaja radica en que idealmente no aportan a la atmósfera más carbónico que el que previamente han secuestrado. Esto último no se cumple en todos los supuestos prácticos, algo que se ha olvidado en la mayoría de las recientes decisiones políticas.

El ímprobo esfuerzo y la energía necesarios para recolectar, trocear y transportar los vegetales, combustibles de baja concentración de energía, ha sido la principal razón por la que esta fuente haya cedido el protagonismo a lo largo de los últimos dos siglos a los combustibles fósiles. Lo que se propone para el futuro no es tanto el uso directo de la biomasa como combustible sino la conversión de ésta en combustibles sólidos y líquidos susceptibles de las más diversas aplicaciones, incluida la del transporte. Los biocombustibles potencialmente derivados de la biomasa son los siguientes: bioalcoholes (etanol, butanol, isobutanol y alcoholes superiores, aditivos para gasolinas), biodiesel (ésteres metílicos y etílicos de ácidos grasos), gas comprimido, producido por la digestión anaerobia de purines y materia orgánica de desechos agrícolas y municipales cuyo producto es el metano, biohidrógeno (producido químicamente a partir de biomasa o producido por microorganismos que aprovechen la energía luminosa), e hidrocarburos varios. Los dos primeros son ya una realidad, aunque pendiente de futuros desarrollos, y constituyen la primera generación de biocombustibles, el metano comprimido tiene más bien una limitada aplicación local, mientras que los restantes biocombustibles son

candidatos a formar parte de la segunda generación. Tanto la biomasa como el bioalcohol y el biodiesel derivados de ella, tienen la ventaja de ser fácilmente incorporables a los sistemas energéticos existentes: la biomasa puede usarse de modo intercambiable con el carbón mineral en diversos tipos de instalaciones térmicas, paliando así el impacto ambiental de la combustión de éste, y lo mismo ocurre con el etanol y el biodiesel, que son intercambiables con los derivados del petróleo en distintos tipos de motores.

En la actualidad, el petróleo y otros combustibles fósiles no sólo constituyen la principal fuente energética sino que son los sustratos casi exclusivos de la industria química. Por tanto, es importante señalar que la biomasa es también una alternativa parcial como base material de dicha industria. De hecho, la viabilidad práctica y los condicionantes económicos de los combustibles derivados de la biomasa dependen en gran medida de esta segunda aplicación, lo que no ha pasado desapercibido para un sector industrial que con tanto vigor como sigilo hace tiempo que viene preparándose para el cambio. Idealmente, las futuras biorefinerías deberán abordar el procesamiento integrado de la biomasa para atender ambos usos, la producción de combustibles y la de sustratos para la industria química.

LA PRIMERA GENERACIÓN

Cuando hablamos de biomasa combustible nos referimos a la lignocelulosa que forma parte de plantas herbáceas o leñosas. Su contenido energético por kilogramo es aproximadamente un tercio del correspondiente al gasóleo. Resulta obvio que si un agricultor alimenta su chimenea con madera

recolectada en las inmediaciones de su casa o quema *in situ* una planta seca, devuelve a la atmósfera el CO₂ que la planta fijó previamente, por lo que no hará una contribución neta al CO₂ atmosférico. Sin embargo, si la biomasa se quema después de cortarla con una herramienta a motor, recolectarla y transportarla en un tractor que funcione con energía fósil y acondicionarla y compactarla (astillas, pellets o briquetas), en una instalación industrial, y distribuirla a larga distancia, habrá que tener en consideración las emisiones de anhídrido carbónico del tractor, del funcionamiento de la maquinaria y la instalación, y del transporte, por lo que la operación energética real ya no merecerá, en parte o en absoluto, el adjetivo de renovable. Como veremos, en muchas de las circunstancias, la operación puede resultar en una emisión de CO₂ superior a la que resultaría de consumir energía fósil, e incluso puede requerir una aportación de energía mayor que la rendida en destino por el producto.

Una instalación de producción de briquetas que rinda cien mil toneladas anuales requerirá para su abastecimiento la biomasa producida por una superficie de entre diez mil y quince mil hectáreas de suelo. Las especies vegetales que se han empleado hasta ahora con mayor o menor éxito incluyen herbáceas, tales como los tallos de maíz y los cardos, y leñosas, principalmente sauces, chopos o eucaliptos, cuya mejora genética y optimización del cultivo para la nueva aplicación están lejos de haber alcanzado su pleno potencial. No todas las fuentes de biomasa permiten cumplir con las exigencias de calidad establecidas. A pesar de estas puntualizaciones, la combustión directa de biomasa es la utilización energética que mejor aprovecha la energía luminosa fijada por la fotosíntesis.

La fermentación alcohólica es uno de los procesos industriales más antiguos que se conocen y constituye la base de uno de nuestros vicios más arraigados. Sin embargo, el uso del alcohol como biocombustible es relativamente reciente y sólo ahora empieza a tomarse en serio. Fue Pasteur en el siglo XIX, quien descubrió que las levaduras eran los agentes de la fermentación alcohólica. El proceso se ha refinado considerablemente a lo largo del último siglo y en la actualidad se trata de buscar y mejorar cepas de levadura y otros microorganismos que toleren concentraciones finales de alcohol lo más altas posibles y que sean insensibles a otras inhibiciones que son particularmente acusadas en los hidrolizados de lignocelulosa.

Aunque hace más de setenta años que Brasil, país pionero, produce alcohol para usar como carburante a partir de la sacarosa de la caña de azúcar (*Saccharum officinalis*), fue la crisis petrolífera de los años setenta la que determinó el compromiso estatal de apoyar la producción de este combustible para ser usado en automóviles. Brasil es el primer productor mundial de caña de azúcar y de alcohol de caña, seguido a larga distancia por la India, y posee grandes extensiones de suelos óptimos para este cultivo. La remolacha azucarera o la uva también contienen azúcares directamente fermentables (glucosa, fructosa, sacarosa, maltosa y otros), pero los rendimientos y costes de producción no son competitivos con la caña de azúcar. Típicamente, el jugo que contiene la sacarosa se extrae de la caña, cuyo bagazo triturado se usa como combustible en el propio proceso industrial y la energía excedente se convierte en electricidad.

La tecnología básica para la producción de etanol a partir del almidón de los granos (inicialmente trigo y cebada; más tarde, maíz) ha estado disponible

de un modo empírico desde que, ya antes de Nabucodonosor, se aprendió a fabricar cerveza. Los almidones son polímeros de glucosa, de los que se liberan azúcares fermentables (glucosa y maltosa) mediante hidrólisis facilitada enzimáticamente por las amilasas. Inicialmente se usaron granos parcialmente germinados como fuentes de amilasas y en la actualidad se dispone de una variada gama de amilasas purificadas industrialmente a partir de microorganismos. Se trata, por tanto, de una tecnología madura cuya mejora se centra hoy en la gestión de la energía y el agua a lo largo del proceso.

Lo mismo que, hace un siglo, Henry Ford usó alcohol para propulsar el mítico Modelo T de automóvil, parece que Rudolph Diesel usó aceite de cacahuete para probar el prototipo de motor que le llevaría a la fama. Una gran variedad de derivados de ácidos grasos de origen biológico son susceptibles de sufrir combustión en un motor diesel convencional, si bien los aceites vegetales (ésteres de ácidos grasos y glicerol) tienden a ensuciar y obstruir los motores a causa del glicerol, especialmente los inyectores, y resulta conveniente una sencilla transformación previa (transesterificación) a derivados del metanol y el etanol (ésteres de los alcoholes metílico y etílico) que no presentan dicho problema. Un destino ideal de los aceites culinarios ya usados es el de transformarlos en biodiesel, pero el volumen que se genera de éstos está lejos de ser significativo como sumando frente a la demanda potencial de este biocarburante. El uso directo de aceites culinarios, tales como los de soja, girasol o colza está muy limitado por su alto precio, lo que dificulta en extremo que puedan competir con los productos petrolíferos, salvo bajo fuertes subvenciones.

LA SEGUNDA GENERACIÓN

La mayor parte de la glucosa y otros azúcares presentes en la naturaleza se encuentra en la pared de la célula vegetal, en forma de polímeros considerablemente recalcitrantes a la hidrólisis, proceso que sería necesario para liberar los mencionados componentes de las complejas cadenas de las que forman parte. Hasta un 90% del material vegetal seco es pared celular, compuesta de polisacáridos y lignina. El polisacárido dominante es la celulosa, un material fibroso que integra unidades de glucosa ligadas por un tipo de enlace (beta-glicosídico) que es difícil de romper. La celulosa se halla envuelta en hemicelulosa, otra cadena polimérica ramificada cuyo azúcar más abundante es la xilosa. La lignina no es un polisacárido sino un complejo polímero fenilpropanoide, irregular y esencialmente insensible a la degradación enzimática. Los azúcares presentes en la pared celular, una vez liberados, se fermentan de la misma forma que los que están presentes en forma libre en la caña de azúcar y la remolacha o se liberan fácilmente por hidrólisis enzimática de los almidones del maíz y otros granos. Así como en la producción de alcohol a partir de almidones, la dificultad insalvable está en los costes y otros problemas de la producción de la materia prima, en el caso de los polisacáridos de pared celular, el gran problema, tanto técnico como económico, está en encontrar un método eficiente para liberar sus azúcares. El premio a ganar, si se supera dicha limitación, es de enorme importancia porque supondría la capacidad de convertir integralmente la biomasa en combustible líquido.

No existen en la actualidad instalaciones comerciales para la producción a gran escala de etanol a partir de biomasa, pero son varias las compañías

que, más bajo capa de secreto que tras escudo de propiedad intelectual, están a punto de irrumpir tímidamente en el mercado. En Canadá, funciona hace tiempo una planta piloto que produce alcohol a partir de lignocelulosa por un método discontinuo ya anticuado (logen), y en marzo de 2007, el Departamento de Energía de Estados Unidos anunció una abultada subvención para que seis biorefinerías produzcan etanol a partir de biomasa celulósica no alimentaria: tallos de maíz y paja de trigo, serrín y papel, y biomasa de la planta perenne *Panicum virgatum*.

El esquema típico a escala piloto implica un paso previo, energéticamente costoso y mal resuelto, de pulverización del material, que es entonces sometido a hidrólisis ácida en caliente para liberar parte de los azúcares de las hemicelulosas y otros polímeros, así como para separar la lignina; el primer residuo insoluble es sometido a continuación a hidrólisis enzimática con celulasas y glicosilasas que liberan la glucosa de la celulosa, dejando finalmente un residuo insoluble que contiene la lignina y cuya combustión genera, al menos en parte, la energía necesaria para la transformación.

La metodología disponible para este proceso dista mucho de estar optimizada, tanto desde el punto de vista de la eficiencia como del de los costes energéticos y económicos. Así por ejemplo, aunque su coste se ha reducido al 10% en una década, la enzima celulasa para hidrolizar la celulosa sigue siendo un ingrediente caro y poco eficiente, y están por encontrar los microorganismos más apropiados para fermentar los azúcares de los extractos de pared celular, sustratos mucho más hostiles para la vida microbiana que los hidrolizados de almidón.

Otra opción para la biomasa es la de convertirla en un gas enriquecido en hidrógeno y monóxido de carbono. Este gas puede transformarse en diesel de alta calidad gracias a la llamada síntesis de Fischer-Tropsch, proceso desarrollado en Alemania antes de la última guerra mundial. El proceso es igualmente aplicable al carbón, la fuente de energía más barata y más abundante de que disponemos. Si se combinara con un método eficiente de secuestro de anhídrido carbónico, la relación de carbónico emitido frente al incorporado podría ser negativa para la biomasa y cero para el carbón mineral. Sin embargo, el valor energético del combustible producido por este método a partir de biomasa sería menor que el generado si ésta se destina a producir etanol.

El etanol es muy higroscópico, plantea problemas de corrosión y no se deja transportar fácilmente por tubería (sólo Brasil ha abordado dicho transporte). Los alcoholes de cadena más larga plantean menos problemas de este tipo. Así, por ejemplo, varias empresas han declarado su intención de producir butanol o su isómero, isobutanol, por fermentación a partir del azúcar de la remolacha o por otros procesos. Este alcohol de cuatro carbonos, que es más hidrofóbico que el etanol, se separa espontáneamente de la fase acuosa de fermentación, ahorrando así la energía y los costes de la destilación, y es menos corrosivo e higroscópico, lo que facilita su transporte mediante tuberías a larga distancia. Sus principales problemas son su mal olor y su toxicidad.

Finalmente, una posibilidad que se está explorando es la de aprovechar ciertos microorganismos que generan metano o secretan alcanos no distintos de los presentes en los hidrocarburos fósiles, pero estas aplicaciones distan mucho de estar próximos a alcanzar el mercado.

POTENCIALES Y RENDIMIENTOS

En la actualidad, las necesidades energéticas mundiales equivalen a unos 170 millones de barriles de petróleo al día. Una hipotética plantación de *Miscanthus* (2% de eficiencia de conversión de la energía luminosa; 80% aprovechable; 35% recuperación como electricidad) debería ocupar algo más del 3% de la superficie terrestre para cubrir nuestras necesidades energéticas. Como es evidente que la citada planta no puede crecer en cualquier sitio y que las demás posibles fuentes vegetales distan mucho de rendir las toneladas de biomasa por hectárea que ésta puede llegar a producir, hay que concluir por esta vía, sin salirnos del plano de la hipótesis, que la producción biológica de la energía que consumimos requeriría del orden del 7-8% de la superficie terrestre, una fracción que sería ya comparable a la que dedicamos a producir alimentos (~11,5 % de la superficie global). Si bien es cierto que la agricultura bioenergética sería algo menos agresiva con respecto al medio ambiente que la alimentaria (menos fertilizantes y productos agroquímicos y una recolección tardía más respetuosa con la biodiversidad) no es menos cierto que la producción masiva de biocarburantes tendría un nada desdeñable impacto adicional sobre el medio ambiente, aparte de que se habría de buscar suelo donde no lo hay. Tampoco conviene olvidar que, en el escenario bioenergético actual, el equivalente en grano de la dieta de un ser humano sería siete veces inferior al de un automóvil que recorriera 20.000 kilómetros al año.

En Brasil se produjeron alrededor de 15.000 millones de litros de etanol en 2005, lo que representó un 40% del combustible líquido empleado para

automoción en dicho país. La flota de automóviles en Brasil está mayoritariamente dominada por motores flex-fuel que admiten una variada gama de mezclas alcohol-gasolina, mientras que sólo el 2% de la flota norteamericana dispone de dicha tecnología, lo que limita al 10% la proporción de etanol que se puede incorporar, que es la que admite un motor normal de gasolina. Estados Unidos, que dedicaba unos 40 millones de hectáreas al cultivo del maíz (*Zea mays*), antes de la fiebre del oro bioenergético, ha aumentado desde entonces la superficie dedicada a dicho cultivo a cambio de disminuir la de soja; y si en 2005, el 16% de esta cosecha se destinó a producir en torno a 13.000 millones de litros de alcohol en un centenar de plantas industriales, hoy se dedica al mismo fin el 23 % de la superficie sembrada de maíz.

Debido a que en comparación con la producción de carbohidratos, la proporción de biomasa que resulta convertida en lípido es mucho menor, el biodiesel tiene un menor uso potencial que el bioalcohol. Así por ejemplo, el rendimiento medio de una hectárea de soja o de colza estaría entre 0,5 y 1 tonelada de aceite, cuyo equivalente calórico es muy inferior al del alcohol que podría producirse en la misma superficie. Sin embargo, el biodiesel sería prioritario en Europa, que es muy deficitaria en refinerías para diesel. En un estudio reciente, hecho para el Congreso de los Estados Unidos, se concluye que si se usara todo el lípido vegetal y animal producido en dicho país para convertirlo en biodiesel, no se cubriría ni el 3% de sus necesidades de combustible líquido.

Si se dedicara toda la cosecha de grano de maíz de Estados Unidos a producir bioalcohol y toda su producción de haba de soja a biodiesel, apenas

se sustituiría el 12% de sus necesidades de gasolina y el 7% de las de biodiesel. En cambio, el aceite de palma (*Elaeis sp.*) puede desempeñar un papel importante en los países en desarrollo situados en la franja ecuatorial, ya que llega a rendir hasta 7 toneladas de aceite y 10 toneladas de biomasa por hectárea sin requerir apenas insumos. La superficie sembrada con otras especies como la palma *Orbignya sp.* en América del Sur o la euforbiácea *Jatropha curcus*, tolerante a la sequía, también está en aumento. Esta última especie sería apropiada para terrenos que no se prestan a la producción de alimentos.

El potencial de la producción de alcohol a partir de celulosa y otros polímeros de la pared celular es considerable. Se estima que Estados Unidos podría cubrir la mitad de sus necesidades de automoción si aprovechara sus residuos agrícolas (hojas y tallos de maíz, paja de trigo, etc.) y cubriera algo menos de 20 millones de hectáreas con gramíneas perennes, tales como las poáceas *Panicum virgatum* y *Miscanthus gigantea*. Este cálculo teórico adolece de limitaciones que mencionaremos más adelante.

GASTO DE ENERGÍA FÓSIL PARA PRODUCIR BICOMBUSTIBLE

Es esencial realizar determinadas auditorías y balances respecto a la generación de cada tipo de biocombustible para estar seguros de su conveniencia. Hay al menos cuatro preguntas que deben ser contestadas: ¿Es mayor la energía del producto final que la fósil usada para producirlo? ¿Ahorra emisiones de gases con efecto invernadero en comparación con las energías

fósiles? ¿Cuáles son sus otros efectos medioambientales? ¿Es o será viable económicamente?

El balance neto de energía (BNE), la relación entre el contenido energético del producto y la energía gastada en su producción, es muy alto en el caso de los combustibles fósiles (BNE entre 40 y 70) y se estima un BNE en torno a 8-10 para el alcohol de caña, mientras que existe considerable controversia respecto a su valor para otros procesos. En el caso del petróleo, el BNE ha ido disminuyendo a medida que se ha buscado en sitios más recónditos y hay quien piensa que la guerra de Irak se está haciendo para acceder a yacimientos de alto BNE.

En el cálculo de la energía gastada deben incluirse partidas tales como los costes energéticos de sembrar y recolectar el grano, las labores agrícolas, la fabricación, el transporte y la distribución de fertilizantes y fitosanitarios, la fabricación de la maquinaria agrícola y de la instalación industrial, además de las propias del proceso de producción de alcohol, tales como la molienda, la destilación y la deshidratación. Algunos escépticos, como el ecologista David Pimentel, consideran que mientras el BNE correspondiente a quemar algunas plantas perennes puede ser elevado (BNE entre 10 y 15), el de la conversión de éstas a alcohol puede ser desfavorable (BNE de 0,7), y lo mismo ocurre con el que adjudica al alcohol de maíz, menor que la unidad, lo que implicaría que la energía del etanol producido sería inferior a la necesaria para producirlo. Un riguroso análisis, recientemente publicado³, es más optimista al concluir que la producción de alcohol a partir de grano de maíz rinde un 25% más de energía de la que consume (BNE = 1,25). Si, como se hace en algunas plantas de Estados Unidos, se usa energía fósil en dicha producción, desde el punto de

vista de las emisiones de CO₂, el alcohol deja en gran parte de ser una energía renovable. Este cálculo se refiere a bioalcohol producido en plena zona maicera, por lo que si se procesa el maíz americano en Europa, el BNE será probablemente desastroso.

En el caso del alcohol producido a partir de pared celular, el BNE podría ser bastante elevado, pero sólo una vez que se mejore el proceso de liberación de azúcares fermentables. Como ya se ha indicado, el proceso de transesterificación de aceites vegetales para producir biodiesel es muy sencillo y apenas consume energía. Por esta razón, el BNE del biodiesel a partir de aceite de soja, o de colza en Europa, es más favorable que el del alcohol a partir de maíz: en la producción in situ de biodiesel se genera un 93% más energía de la que se consume (BNE = 1,93)².

REDUCCIÓN DE EMISIONES E IMPACTOS AMBIENTALES

Es evidente que las especies bioenergéticas más apropiadas serán diferentes en cada región agrícola. China experimenta con la batata, Canadá se inclina por el maíz y el trigo, Estados Unidos, por el maíz, y Tailandia, Malasia e Indonesia optan por el aceite de palma, mientras países como la misma China, Austria, Ghana, Nueva Zelanda y, sobre todo, Suecia llevan tiempo desarrollando combustibles sólidos y líquidos a partir de biomasa forestal. Sea cual sea la opción agroenergética, habrá que tener en cuenta sus consecuencias en relación con el uso del suelo laborable y con su impacto sobre el medio ambiente.

Ya a principios de la última década del siglo XX, Suecia adoptó bruscamente su actual política bioenergética, que aspira a la autosuficiencia para el año 2020. En la estación experimental de Svalöv, uno de los centros más antiguos de mejora genética de plantas y sede de la mayor colección de germoplasma de cebada en el mundo, se celebró 1991 el VI Simposio Internacional de Genética de la Cebada en un clima de cierta desolación, debido a la decisión sueca de reducir a la mitad la superficie sembrada de dicho cereal. Buena parte de los campos de la estación experimental estaban ya ocupados por ensayos comparativos de especies y variedades autóctonas de sauces para evaluar su capacidad de producir biomasa. La mejora del rendimiento y la modificación genética de la lignina están entre los objetivos que se han perseguido vigorosamente. Una gran ventaja de la biomasa procedente de plantas perennes, incluidas las leñosas, es que su recolección no está restringida a una estrecha ventana temporal, lo que permite alimentar regularmente la planta industrial sin necesidad de almacenar en poco tiempo grandes cantidades del material de partida.

La caña de azúcar es una especie agronómicamente generosa: convierte directa y eficientemente la energía luminosa en azúcar fermentable, se planta cada cinco años y requiere pocos insumos en comparación con el maíz. Así por ejemplo, en la mayor parte de su área de cultivo en Brasil no necesita irrigación. El del maíz, en cambio, es un cultivo exigente e intensivo, que además rinde mucho menos combustible por hectárea que la caña. En Brasil se cultiva la caña en 5,7 millones de hectáreas, una pequeña parte de sus 850 millones de hectáreas disponibles, y algunos expertos opinan que el cultivo podría extenderse hasta unos 100 millones de hectáreas de viejos

suelos agrícolas y pastizales en el centro-sur del país, sin competir con la producción de alimentos y sin destruir bosque tropical. Esta opinión dista mucho de ser aceptada sin matices por todos los expertos. Frente a las opiniones más optimistas, hay que tener en cuenta a los críticos que llaman la atención sobre efectos colaterales del cultivo de caña, tales como la alta erosión de suelo laborable (hasta 30 toneladas por hectárea y año) y la contaminación atmosférica producida al “chamuscar” los campos dos veces al año antes de la recolección.

Las grandes plantaciones de palma y especies afines están proliferando en África, India y el sureste Asiático de la mano de grandes intereses industriales, y por desgracia, la superficie plantada en países como Indonesia y Malasia estaba a menudo previamente ocupada por bosques tropicales. Por ejemplo, los orangutanes de la isla de Borneo están a punto de extinguirse a causa de los avances de las plantaciones de palma, según los zoólogos encargados de estudiarlos.

De lo que antecede, una sustitución significativa de la energía fósil por energía de origen agroforestal supone un considerable acaparamiento del suelo disponible. Ya hacia mediados del siglo XX habíamos ocupado la mayor parte de los suelos óptimos para la agricultura, así como millones de hectáreas que jamás debieron ser cultivadas. En las últimas décadas, la roturación de nuevo suelo ha progresado más despacio que su destrucción debida a la erosión, la desertificación o la invasión urbana, y el crecimiento demográfico ha hecho que el suelo laborable disponible por persona para alimentación haya disminuido rápidamente de media hectárea a un cuarto de hectárea. La nueva demanda de suelo para producir energía sólo puede satisfacerse dando un

nuevo uso a terrenos cultivados o invadiendo espacios naturales, con la consiguiente destrucción de habitats.

Los biocarburantes pueden disminuir emisiones de CO₂ por unidad de energía, pero sólo en ciertas circunstancias. Si se tienen en cuenta todos los componentes de la contabilidad, las cuentas no suelen salir. En EEUU, donde se han sobrepasado con creces los objetivos propuestos de producción de bioalcohol de primera generación, para el que es ahora obligatorio reducir las emisiones en un 20 % si se aspira a la subvención, se está pendiente de la publicación por parte de la *Environmental Protection Agency* EPA de las normas concretas para calcular dicha reducción y se teme que gran parte de la producción actual no cumpla lo estipulado, como también se duda seriamente que los biocombustibles de segunda generación puedan cumplir la también estipulada reducción del 40 %. En Europa, la exigencia de una reducción del 35% para la primera generación parece que anda descarriada. Dos estudios recientes, publicados en la revista *Science*^{3,4}, demuestran que si se convierten bosques tropicales, turberas, sabanas o pastizales a la producción de cosechas bioenergéticas, en Brasil, el Sureste Asiático o Estados Unidos, se crea una “deuda carbónica” que puede representar entre 17 y 420 veces el ahorro anual de emisiones que supondría la producción de biocarburantes conseguida. En contraste, el uso de biomasa producida en suelos agrícolas abandonados o degradados o procedente de desechos vegetales no generaría prácticamente deuda alguna. En el caso concreto del alcohol producido a partir de maíz, en lugar de un ahorro de emisiones del 20 % previamente estimado, se doblarían las emisiones durante 30 años; y si se cultiva *Panicum virgatum* en tierras dedicadas previamente al maíz, también habría un aumento de emisiones del

50 %. En un informe reciente de las academias nacionales de EEUU (octubre de 2007), se ha llamado también la atención sobre cómo la expansiva implantación de cultivos con fines energéticos está cambiando el panorama agrícola y ejerciendo una considerable presión sobre los recursos hídricos.

Si ampliamos el análisis al conjunto de consecuencias ambientales positivas y negativas, podemos encontrarnos con que, aún en los casos en que hay ahorro de emisiones con respecto a la energía fósil, se da un impacto ambiental desfavorable para la fuente bioenergética. Aspectos tales como el impacto sobre la biodiversidad, el funcionamiento hidrológico o la protección del suelo pueden hacer cambiar el veredicto sobre una fuente concreta de biocombustible en unas circunstancias determinadas. Así por ejemplo, entre las cosechas productoras de alcohol, el maíz es la que requiere una mayor aportación de fertilizante nitrogenado y, en consecuencia, la que emite más óxido nítrico, que está también entre los gases con efecto invernadero. En un estudio para el gobierno suizo, Zah y colaboradores⁵ han evaluado 26 casos concretos de producción bioenergética, siguiendo dos criterios de comparación con la gasolina, el diesel y el gas natural: las emisiones de gases de efecto invernadero y el impacto medioambiental total, medido este último según un indicador agregado. Si bien 21 de los 26 casos dados de generación de biocombustibles reducían las emisiones al menos en un 30 %, más de la mitad de ellos suponían mayores costes medioambientales agregados que la gasolina. Entre los desfavorables se encontraban todos los más usados en la actualidad: alcohol de maíz en EEUU, alcohol de caña y diesel de soja en Brasil o diesel de palma en Malasia. En este informe, salen bien paradas, como fuentes de energía, el alcohol a partir de biomasa vegetal y desechos agrícolas,

cuando se acabe de inventar. Aunque todos estos estudios no están exentos de dificultades e incertidumbres, no hay más remedio que concluir que no es siempre verde lo que lo parece y que, una vez más, el prefijo “bio” no indica necesariamente compatibilidad con el medio ambiente.

BALANCES ECONÓMICOS E IMPACTOS SOCIALES

El apoyo al desarrollo de las tecnologías bioenergéticas fue sustancial durante la crisis petrolífera de los años setenta y se desvaneció tan pronto como bajaron los precios del petróleo. Ahora estamos en una nueva crisis, no de reservas sino de precios, y el apoyo a la i + d y al uso de la tecnología bioenergética ha resurgido con fuerza, esta vez con la novedad de que se están uniendo en el esfuerzo compañeros de viaje tan improbables como empresas petrolíferas (Shell, British Petroleum y otras), grupos ecologistas, fabricantes de automóviles (Toyota, General Motors y otros), grandes industrias químicas (DuPont) y nuevos inversores (Acciona, Abengoa y otros). Organizaciones como la OCDE, EuropaBio (Bruselas) y BIO (Washington), junto a conocidos asesores financieros, apoyan la aventura y defienden su viabilidad a partir de precios del barril de petróleo por encima de los 40 \$, una condición que lleva camino de mantenerse, principalmente por el incremento de la demanda y por las guerras y conflictos que afectan a importantes áreas de producción. Hasta George W. Bush ha acabado subiéndose al carro. Aunque los costes de producción de los biocombustibles han ido disminuyendo casi tan deprisa como han aumentado los precios de la energía fósil, todavía son lo bastante altos como para necesitar toda suerte de estímulos y subvenciones

que permitan progresar hacia sucesivos abaratamientos que hagan competitiva la fuente renovable frente a la que no lo es.

El precio del alcohol brasileño, a 0,20 € el litro en 2005, estaba ya por debajo de los de la gasolina (antes de impuestos) en Estados Unidos y la Unión Europea. El alcohol norteamericano, a pesar de la subvención a los productores y a los procesadores del maíz, no podía competir con el brasileño o con la gasolina, por lo que George W. Bush impuso una tasa a la importación de alcohol, con gran indignación de su hermano Jeb, gobernador del estado de Florida, que es gran cliente de los brasileños. De todas formas y para mantener el sentido de la proporción, conviene señalar que el etanol producido en Brasil es menos de la cuarta parte del petróleo total consumido en dicho país.

La producción de alcohol a partir de granos, inviable económicamente salvo subvención, únicamente se podría justificar como prólogo capacitador y promotor de infraestructuras para el advenimiento de la potencialmente más rentable, pero todavía muy problemática, producción de alcohol celulósico. En Estados Unidos, el desvío de una fracción creciente (23 %, en 2007) de la cosecha de maíz hacia la producción de etanol, junto a la creciente demanda de grano desde países como China o India, hizo que en 2006 la cotización del grano en el mercado de materias primas de Chicago se duplicara (de ~80 \$/tonelada a ~160 \$/tonelada), en una tendencia que se ha mantenido hasta 2008, sin que parezca que vaya a desinflarse. La subida del precio de la materia prima ha puesto en alerta a los inversores en la industria de los biocarburantes, cuyos beneficios dependen del bajo precio de ésta, de fuertes subvenciones y de altas barreras arancelarias para el etanol importado. Lo que además es realmente mucho más grave, es que ha motivado que países como

México reduzcan sus importaciones de maíz-pienso (transgénico) y que la “etanoinflación” se transfiera al maíz blanco de producción autóctona, alimento básico de la población, ya que es el ingrediente de las míticas tortillas y de otros platos fundamentales. La duplicación del precio de las tortillas ha provocado masivas manifestaciones de protesta que han inundado el Zócalo de México DF a principios de este año. El alto precio del maíz hace que se dediquen a su producción tierras previamente dedicadas a otras producciones (p. ej., arroz o soja) y que se eleven los precios de éstas, por menor oferta. Suben los precios de las carnes y, por ejemplo, se estimula la deforestación del Amazonas para producir maíz o para disponer de pastos para el ganado. Estos acontecimientos sugieren que producir biocombustibles, en ciertas circunstancias, puede suponer que para vestir a un santo se esté desnudando a otro.

Es evidente que la subida global de los precios de los alimentos no ha sido solamente un efecto directo de la producción de biocombustibles, pero es insostenible negar que tanto directa como indirectamente (mercado de futuros) ha sido uno de los factores determinantes. Las estimaciones más bajas, como las de la FAO, cifran entre el 5 % y el 10 %, la posible influencia directa, mientras que otras fuentes llegan a elevarla hasta el 30 %. En lo que no hay discrepancias es respecto a que la influencia será muy significativa si se cumplen los objetivos obligatorios marcados a ambos lados del Atlántico. En cualquier caso, este debate tiende a ocultar algo que es incontrovertible: la subida de precios de los alimentos es al mismo tiempo la de las materias primas para la producción de biocombustibles, lo que hace en extremo difícil la viabilidad económica de la producción de éstos, y no cabe duda que dichos

precios subirán con los del petróleo, de acuerdo como mínimo con las equivalencias energéticas alimentos/petróleo.

Con gran diferencia, la principal partida de los gastos de producción de cosechas celulósicas es la recolección, y le sigue la del lucro cesante asociado al suelo ocupado, que es nula en el caso de los tallos de maíz o de la paja de trigo, pero que es mucho más sustancial de lo que parece para *Miscantus* o *Panicum*, ya que tendrían que cultivarse, en gran parte, sobre suelos que estaban rindiendo beneficios económicos. La producción de aceite de palma y similares en países asiáticos y africanos no supone ventajas económicas significativas para las regiones productoras y sólo beneficia a las grandes empresas involucradas. El resto de los cultivos bioenergéticos suponen una importante fuente de empleo, aunque las condiciones en que se materializan muchos de esos empleos, como por ejemplo, el uso de mano obra esclava y casi esclava en el cultivo de la caña en Brasil, dejan mucho que desear y han suscitado vigorosas críticas.

Mención aparte merece la Unión Europea, donde habría amplio margen para que la producción de biocombustibles frenara el masivo abandono del medio rural. Sin embargo y a pesar de altisonantes declaraciones, en Bruselas sólo se ha decidido fomentar la dedicación a biocombustibles ofreciendo, en el marco de la PAC, una subvención 45 € por hectárea (el sector solicita 80 € por hectárea) para un número ridículamente pequeño de hectáreas, política que además está a punto de abandonarse. Una Europa que empieza a salir del laberinto de las subvenciones agrícolas tendría que crear uno nuevo de semejantes dimensiones y complejidad, si decide acompañar sus deseos con acciones apropiadas.

Los estudios más rigurosos, por ejemplo el del propio *Joint Research Center*⁶, no son muy favorables respecto a la viabilidad de los objetivos obligatorios de la UE. En primer lugar, no parece probable que se fuera a producir un ahorro de emisiones de gases con efecto invernadero, debido a lo incierto de los efectos indirectos, y mucho menos alcanzar el 35 % de ahorro que se pretende imponer tanto a los biocombustibles propios como a los importados. Respecto a la seguridad del suministro, cualquiera de las opciones europeas pasan por tal grado de importación del producto final, o de las materias primas para producirlo, que el efecto positivo sería mínimo. De hecho, sin subvenciones no habría producción propia, y la única fuente que cumpliría los requerimientos europeos de ahorro de emisiones sería el bioalcohol brasileño, incapaz de proveer nuestra considerable demanda. Sin producción propia, el efecto sobre el empleo sería insignificante. Según el mismo estudio, el coste de usar biocombustibles sobrepasaría a los beneficios. Además, el consumo de energía fósil constituye uno de los mayores caladeros recaudatorios de los estados europeos, y cambiar el cobro de impuestos por el pago de subvenciones no parece que vaya a resultar muy grato a los sufridos ministros europeos de hacienda.

Si producir alcohol en plena región maicera es desventajoso desde todos los puntos de vista, producirlo con maíz traído desde EEUU a un puerto español y gas natural traído desde Argelia, para aportar la energía necesaria, sería aún más desfavorable. De las 22 plantas españolas dedicadas a producir combustible de origen vegetal, sólo 3 funcionan regularmente porque al elevado precio de la materia prima se le ha venido a sumar otra circunstancia extremadamente adversa: la importación masiva de bioalcohol y biodiesel

norteamericanos que, subvencionada en origen a tenor de 139 € por tonelada, se beneficia también en destino del “impuesto cero” para los biocombustibles.

El alto precio del petróleo es coyuntural y no hay evidencia de que se haya gastado más de la mitad de las reservas de dicha fuente de energía. Además, las reservas de carbón existentes darían para varios siglos de consumo si se resolviera el problema de cómo secuestrar el anhídrido carbónico que se emitiera. Como ha indicado Chris Somerville, flamante director del *Energy Biosciences Institute*, que British Petroleum ha creado en la Universidad de Berkeley con una inversión de 500 millones de dólares: “Si se ignora el problema del clima, no hay un motivo acuciante para desarrollar los biocombustibles.”⁷

PANORAMA PROBLEMÁTICO

Aunque, en un hipotético caso extremo, los biocombustibles podrían cubrir todas nuestras necesidades energéticas, en la práctica sólo llegarían a sustituir a una fracción muy limitada, aunque no desdeñable, de la energía fósil que consumimos, y precisamente por las limitaciones de su producción, ésta no debe servir de coartada para seguir despilfarrando energía como hasta ahora.

La productividad y la composición de las especies y variedades vegetales utilizadas con fines energéticos no han sido todavía optimizadas para esa aplicación (técnicas de cultivo, mejora vegetal, ingeniería genética) y cabe esperar progresos sustanciales en estos componentes del problema.

El desarrollo de métodos para la conversión industrial de biomasa en biocarburantes está todavía en su infancia, especialmente la liberación de

azúcares fermentables a partir de lignocelulosa. Los incentivos son grandes, pero las dificultades también. En la medida que tanto EEUU como la UE, han incluido los biocombustibles de segunda generación en sus objetivos obligatorios, se han tirado a una piscina vacía que no es seguro que se llene a tiempo.

Aparte de los escollos de su desarrollo tecnológico, las principales limitaciones de la producción de biocombustibles son su posible competencia por el suelo laborable con las cosechas alimenticias y la invasión de habitats naturales, degradados o no.

La aventura brasileña, aunque no exenta de inconvenientes y contraindicaciones, es por ahora la única que progresa por sí sola y se mantiene dentro de límites razonables en su impacto ambiental.

El uso de granos de maíz y otros cereales para producir alcohol adolece de unos costes elevados, un balance de emisiones y un BNE desfavorables, y de unos futuros efectos económicos perniciosos sobre el precio de alimentos básicos y sobre el problema del hambre en el mundo.

La producción de biodiesel es cara por ineficiente, salvo en el caso de las plantaciones de palma. Sin embargo, dichas plantaciones suponen un verdadero problema ecológico y una dudosa ventaja económica para los países donde se establecen, aunque sean beneficiosas para los intereses industriales que las controlan.

La producción de biocombustibles es por ahora un método muy caro de ahorrar emisiones de gases con efecto invernadero.

1. European Commission, 2008. Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on the promotion of the use of energy from renewable resources. COM(2008). Disponible en [http://ec.europa.eu/energy/climate actions/doc/2008](http://ec.europa.eu/energy/climate_actions/doc/2008)
2. C. Somerville (2007) *Current Biology* 17: R115-r119
3. J. Fargione et al. (2008). *Science* 319: 1235-1238
4. T. Searchinger et al. (2008). *Science* 319 :1238-1240
5. R. Zah et al., *Ökobilanz von Energieprodukten: Ökologische Bewertung von Biotreibstoffen* (Empa, St. Gallen, Switzerland, 2007).
6. R. Edwards et al. (2008). *Biofuels in the European Context: Facts and Uncertainties*. European Commission. Joint Research Center JRC44464





