
AGROETANOL ¿UN COMBUSTIBLE AMBIENTALMENTE AMIGABLE?

EUGENIO SANHUEZA

RESUMEN

La preocupación por la seguridad energética y el cambio climático impulsan el uso de los agrocombustibles, cuyo desarrollo se adelantó a las evaluaciones ambientales, generándose una candente polémica. Aquí se revisan los principales cuestionamientos hechos al agroetanol. Los agrocombustibles tienen un balance energético neto positivo; para el etanol de caña de azúcar es ~8 y para el del maíz es <1,5; en teoría, el del etanol celulósico podría llegar a 36. El CO₂ emitido en la combustión del bioetanol no cuenta como gas de invernadero, pero durante su producción se generan tales gases. Al producir etanol de maíz habría un escaso ahorro de emisiones; con caña la reducción de emisiones contempladas en el Protocolo de Kyoto es muy favorable, pero al considerar compuestos no incluidos en aquel, las emisiones de CO₂-eq bajo ciertas condiciones de producción sobrepasarían las de la

gasolina. La producción de agroetanol propicia la transformación de suelos vírgenes, con pérdida de biodiversidad y enormes emisiones de gases de invernadero; los monocultivos intensivos propician erosión, contaminan aguas y disminuyen la productividad y estabilidad de ecosistemas. La competencia por tierras arables aumentaría los precios de alimentos y la polémica sobre organismos genéticamente manipulados se agudizará con el auge de los agrocombustibles. La sustitución de gasolina vehicular por etanol no disminuiría el riesgo de cáncer, aumentaría el smog fotoquímico urbano y las emisiones de metano. El etanol de celulosa tendría menos cuestionamientos ambientales que el producido de cultivos alimenticios, pero el potencial total de producción de agroetanol sólo desplazaría un porcentaje bajo de combustible fósil, manteniéndose una alta dependencia del petróleo.

La preocupación por la seguridad energética y, más recientemente, por el cambio climático, han resultado en numerosos esfuerzos alrededor del mundo para enfrentar tanto el suministro de energía como la defensa del ambiente. Esto, entre otras cosas, ha impulsado el actual “boom” de los agrocombustibles. En 2006 la producción mundial de etanol aumentó 22% y el comercio global de agrocombustibles crecería de USD 20,5 billones en 2006 a USD 80,9 billones en 2016 (Makower *et al.*, 2007). Gran parte de este impulso ha venido dado por mandato, especialmente en países con alto consumo de combustibles líquidos en transporte (Estados Unidos, Unión Europea); en Europa, la meta para 2020 sería que el 10% del transporte consumiera agrocombustibles. Brasil, Estados Unidos y Europa producen ~95% de los agrocombustibles, que propor-

cionan ~1% del combustible líquido utilizado en transporte; Canadá, China e India producen la mayor parte del 5% restante (IEA, 2006b). Entre los países que han hecho mayores compromisos sobre los agrocombustibles se encuentran China, Colombia, India, Filipinas y Tailandia.

Los dos agrocombustibles más utilizados son etanol, actualmente producido a partir de cultivos que producen azúcar o almidón, y biodiésel, producido de aceites vegetales o grasas de animales. Por lejos, la producción de etanol ocupa el primer lugar, siendo principalmente producido en Brasil de la caña de azúcar (16500 millones de litros en 2005) y en Estados Unidos del maíz (16230 millones de litros en 2005; Hunt, 2007). La importancia vital del etanol es que puede, en ciertas condiciones, reemplazar a la gasolina en los motores de combustión interna de los vehículos actualmente en uso. La

demanda de energía primaria se espera que crezca >50% para 2030, siendo la demanda de combustible líquido y electricidad las de mayor crecimiento.

Desafortunadamente, el desarrollo de los agrocombustibles, con inmensas inversiones, se adelantó sin que se hicieran los necesarios estudios ambientales comprensivos y actualmente existe una candente polémica sobre los beneficios, tanto energéticos como ambientales. Una defensa a la sustentabilidad de los agroetanoles, especialmente del etanol de caña de azúcar, se encuentra en los artículos de Goldemberg (Goldemberg, 2007; Goldemberg *et al.*, 2008; Goldemberg y Guardabassi, 2009). En el presente trabajo se hace una revisión de los principales cuestionamientos hechos al agroetanol actualmente producido a partir de cultivos alimenticios (maíz, caña de azúcar) y los potenciales problemas asociados a una pro-

PALABRAS CLAVE / Agroetanol / Ambiente / Cambio Climático / Degradación de Ecosistemas / Energía Renovable /

Recibido: 29/07/2008. Modificado: 13/01/2009. Aceptado: 22/01/2009.

Eugenio Sanhueza. Doctor en Ciencias, Universidad de Chile. Investigador, Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas (IVIC), Venezuela. Dirección: Laboratorio de Química Atmosférica, IVIC. Apdo. 22117, Caracas 1020A, Venezuela. e-mail: esanhuez@ivic.ve

ducción futura de etanol de celulosa. En lo posible, se citan publicaciones arbitradas. Recientemente, varias empresas han venido desarrollando la producción de etanol a partir de microalgas, cuya producción industrial, al parecer, podría iniciarse en un futuro próximo. Sin embargo, todavía no existen evaluaciones independientes en revistas arbitradas, ni sobre su viabilidad (costos, balance neto de energía, etc.) ni sobre posibles impactos ambientales (emisiones de compuestos climáticamente activos diferentes al CO₂ desde los biorreactores, degradación de ecosistemas por deposición de desechos, contaminación de los océanos con microalgas genéticamente modificadas), por lo que una evaluación/visión (propósito de este artículo) de lo amigable/sustentable del etanol de algas con el ambiente no es posible de hacerse por ahora. Sin duda habrá que hacerlo en el futuro.

Balance Neto de Energía de los Agrocombustibles

Una de las preocupaciones (y controversias) acerca de los agrocombustibles está relacionada con la eficiencia de la bioenergía, frecuentemente expresada como el balance neto de energía. Éste es la proporción entre la energía contenida en una unidad de agroenergía y la energía fósil requerida para producir esa unidad. Cuando es mayor que uno, sería eficiente usar agrocombustibles en reemplazo de los combustibles fósiles convencionales. La determinación del balance energético neto de los agrocombustibles es una tarea difícil y desafiante, ya que supone considerar todos los requerimientos energéticos del proceso total para producir y convertir biomasa en combustible. En la Tabla I se dan los balances energéticos netos de los principales agrocombustibles.

Los valores de la tabla muestran que todos los agrocombustibles tienen un balance energético neto positivo (>1). La producción de biodiésel a partir del aceite de palma sería el proceso más eficiente, tanto por rendimiento por ha, como por su balance energético neto. En segundo lugar está el etanol de caña de azúcar. El etanol de maíz tiene, comparativamente, un desempeño bastante pobre. El alto balance energético neto del etanol de caña de azúcar se debe fundamentalmente a la combustión del bagazo como fuente de energía en las "refinerías". De acuerdo a las evaluaciones teóricas, la ganancia de energía del etanol celulósico podría ser muy alta.

Es importante señalar que, por unidad de superficie, las celdas fotovoltaicas colectan entre 100 y 200 veces más energía que las plantas verdes; e.g., la electricidad necesaria para una población de 100000 personas requiere de ~200000ha de bosque sustentable, pero solo ~3000ha de celdas fotovoltaicas (Pimentel, 2005).

TABLA I
RENDIMIENTO ENERGÉTICO ANUAL Y BALANCE ENERGÉTICO NETO DE LOS AGROCOMBUSTIBLES

Cultivo	Combustible	Rendimiento energético anual ^a (GJ/ha)	Balance energético neto ^b
Caña de azúcar	Etanol (de azúcar)	~120	~8
Remolacha dulce	Etanol (de azúcar)	~140	~2
Maíz	Etanol (de almidón)	~70	~1,5
Yuca (mandioca)	Etanol (de almidón)	~80	
Trigo	Etanol (de almidón)		~2
Palma de aceite	Biodiésel	~193	~9
Rapeseed	Biodiésel	~42	~2,5
Semilla de soya	Biodiésel	~14	~3
Celulosa	Etanol		2-36 (teórico)

^a Promedio. ^b Worldwatch Institute (2006)

Efectos Ambientales durante la Producción del Etanol

Emisión de compuestos climáticamente activos y calentamiento global

El CO₂ emitido en la combustión del agroetanol no cuenta como gas de invernadero, ya que sale de vuelta de la atmósfera durante el crecimiento de las plantas que dieron origen al biocombustible. Sin embargo, durante la producción del etanol es necesario el uso de energía, ya sea durante la etapa de cultivo o en su producción en las "refinerías", la cual generalmente proviene de un combustible fósil que produce gases de invernadero. Además, los cultivos requieren de fertilización y debido a los procesos microbianos en el suelo se produce N₂O, el cual es un potente gas de invernadero (298 veces más efectivo que el CO₂ en un horizonte de tiempo de 100 años).

Etanol de maíz. El cultivo de maíz es relativamente poco eficiente desde el punto de vista fotosintético y además requiere de alta fertilización. Por lo tanto, en la producción de etanol de maíz solo hay un pequeño ahorro (12-28%) de las emisiones de CO₂ cuando se utilizan combustibles fósiles en las varias operaciones de cultivo y refinación (Farrell *et al.*, 2006; Hill *et al.*, 2006; Wang *et al.*, 2007). Este ahorro subiría hasta ~50% cuando se utiliza biomasa (e.g., virutas de madera) para alimentar las refinerías y no habría ningún ahorro cuando se usa carbón (Wang *et al.*, 2007). Considerando que las evaluaciones solo incluyen los gases de invernadero contemplados en el Protocolo de Kyoto (CO₂, CH₄, N₂O), las emisiones de CO₂-eq deberían aumentar cuando se consideren otros compuestos climáticamente activos (e.g., monóxido de carbono, carbón negro), algo de importancia cuando se combustiona biomasa en la refinación del agrocombustible (Sanhueza, 2009).

Recientemente Crutzen *et al.* (2008) estimaron que las emisiones de N₂O producidas por la fertilización con N

serían mucho más altas que las utilizadas en las evaluaciones hechas anteriormente. Según estos autores, en la producción de etanol de maíz, el CO₂-eq correspondiente solamente a las emisiones de N₂O sería más alto que el ahorrado al reemplazar la gasolina por etanol.

Etanol de caña de azúcar. La reducción de emisión de gases de invernadero contemplados en el Protocolo de Kyoto es muy favorable (Macedo *et al.*, 2004), debido principalmente al uso del bagazo como bioenergía en las calderas. Sin embargo, esto cambia drásticamente cuando en la evaluación se consideran algunos compuestos no incluidos en el Protocolo. En general, la producción actual de etanol de caña de azúcar involucra, además de la combustión del bagazo, la quema de los cañaverales antes de la cosecha. Estas quemadas de biomasa resultan en la emisión de cantidades significativas de compuestos semioxidados (e.g. CO, carbón negro) a la atmósfera, los cuales son climáticamente activos. Teniendo en consideración estos compuestos, no incluidos en el Protocolo de Kyoto, se estimó que las emisiones de CO₂-eq durante el proceso de producción de etanol de caña sobrepasarían a las producidas por una cantidad equivalente de gasolina que sustituirían (Sanhueza, 2009). La inclusión del carbón negro y otros compuestos climáticamente activos en los acuerdos climáticos internacionales está en plena discusión (Rypdal y Fuglestvedt, 2005; Audiencia, 2007; Bond, 2007).

Cuando en el proceso de producción se evita la quema pre-cosecha y se controlan las emisiones de partículas en las calderas, las emisiones de CO₂-eq estarían por debajo de la de una cantidad de gasolina equivalente, 70% cuando se considera un horizonte de 100 años en los Potenciales de Calentamiento Global (GWPs) y solo 35% en un horizonte de 20 años (Sanhueza, 2009). La no-quema pre-cosecha implica una zafra mecanizada y el control de las emisiones de partículas requiere de costosos equipos. Estos cambios implican altas inversiones

iniciales en instalaciones y equipos, y aumentarían el consumo de energía durante la producción del etanol de caña, bajando su balance de energía neta.

Etanol de celulosa. Producir etanol a partir de celulosa es más complejo que en el caso de la glucosa de la caña de azúcar o el almidón (polímero que es fácilmente degradado a glucosa por enzimas) del maíz. La biomasa utilizada para producir etanol celulósico, que incluye los cultivos energéticos como pasto de caña (*switchgrass*) y desechos agrícolas y forestales, está constituida de celulosa (un polímero de glucosa), hemicelulosa (un polímero de azúcares de cinco átomos de carbono) y lignina, que amarra (enlaza) los otros polímeros en una estructura rígida. Por lo tanto, antes del proceso de fermentación del azúcar para producir el etanol, es necesario liberarla de los otros polímeros constituyentes. El procedimiento tradicional rompe las fibras de las plantas con ácidos diluidos y vapor. Posteriormente, la solución obtenida se expone a enzimas (celulasa y hemicelulasas) para liberar el azúcar, la cual se somete a fermentación (Service, 2007). Las investigaciones tendientes a mejorar las etapas implicadas en el proceso se han llevado adelante por décadas; sin embargo, hoy no existe ninguna planta industrial de etanol de celulosa en funcionamiento. Recientemente en Estados Unidos se han financiado seis refinerías a escala comercial que entrarían en funcionamiento entre el 2009 y 2011 (Service, 2007).

El etanol celulósico tendría potencialmente ventajas ambientales y energéticas sobre los procesos que utilizan cultivos alimenticios como maíz y caña de azúcar (Farrell *et al.*, 2006; Hill *et al.*, 2006; Schmer *et al.*, 2008). Se utilizarían residuos y los cultivos energéticos pueden ser producidos en tierras agrícolas marginales con mínimos agregados de fertilizantes, pesticidas y energía fósil; el pasto de caña (*switchgrass*) produciría 540% más energía que la necesaria para su crecimiento (Schmer *et al.*, 2008). Los cultivos de pastos perennes podrían usarse para proteger tierras vulnerables a la erosión y restaurar tierras degradadas por el pastoreo. Sin embargo, para poder hacer una evaluación más definitiva de las virtudes del etanol celulósico se tendrá que esperar hasta que éste esté comercialmente disponible. Posiblemente habrá que hacer énfasis en evaluar los compuestos climáticamente activos no incluidos en el Protocolo de Kyoto (Sanhueza, 2009), ya que la fuente de energía que se utilizará en su refinación muy probablemente provenga de la combustión de la misma biomasa usada para producir el etanol (Schmer *et al.*, 2008) y/o los desechos de lignina producida en el proceso (Hill *et al.*, 2006).

Cambio en el uso de la tierra

La transformación de ecosistemas naturales como sabanas, bosques o pantanos en suelos agrícolas produce una fuerte pérdida de CO₂ a la atmósfera. Recientemente, esta pérdida de CO₂ se usó para evaluar el impacto de los cultivos utilizados para producir biocombustibles (Righelato y Spracklen, 2007; Fargione *et al.*, 2008; Searchinger *et al.*, 2008). De acuerdo con Fargione *et al.* (2008) la conversión de diferentes suelos naturales emitiría 17-420 veces más CO₂ que lo que se ahorraría en un año por el uso del biocombustible. Por ejemplo, la emisión debida a la conversión de una pradera (*grassland*) a cultivo de maíz en Estados Unidos, correspondería al ahorro producido durante 93 años por el uso de etanol; una sabana arbolada a cultivo de azúcar de caña en Brasil a 17 años. Otro estudio (Righelato y Spracklen, 2007) indica que sembrar árboles sería más favorable para el ambiente que producir y quemar agrocombustibles. La reforestación de un área equivalente a los cultivos energéticos secuestrarían 2-9 veces más CO₂ por un periodo de 30 años, comparado con la emisión que se evitaría con el uso del agrocombustible.

Estos resultados indican que los biocombustibles, para ser climáticamente favorables, deben ser producidos en tierras baldías o marginales y/o en áreas agrícolas actualmente en uso. Es posible que las siembras actuales de maíz y caña de azúcar se estén haciendo en tierras agrícolas, pero el problema es que estos cultivos estarían desplazando las siembras de otros cultivos alimenticios (Butler, 2007), obligando a la utilización de suelos vírgenes para suplir la creciente demanda de comida, produciéndose altas emisiones de CO₂ y grandes pérdidas de la biodiversidad natural. Se estima que sustituir 10% de la gasolina o diésel por agrocombustibles, requeriría de ~43% y ~38% de la actual tierra de cultivo en Estados Unidos y Europa, respectivamente (Righelato y Spracklen, 2007).

De acuerdo con la FAO (2007) entre 1990 y 2005 se perdió ~3% de la cobertura global de bosques, con una velocidad de ~0,2% por año, que corresponde a 8 millones de ha/año, o 22000 ha/día. Sin embargo, esta cifra no sería realista ya que incluye el crecimiento de bosques seminaturales y aun plantaciones de monocultivos, que tienen muy poco de la biodiversidad y balance de los ecosistemas naturales (Smolker *et al.*, 2007). La pérdida de bosques húmedos tropicales, entre 2000 y 2005, sería de ~27 millones ha, que corresponde a ~2,4% de los bosques existentes. La mayor deforestación (~48%) estaría ocurriendo en Brasil (Hansen *et al.*, 2008). Una de las principales causas de deforestación sería la expansión de tierras agrícolas, especialmente para producción de

ganado, soya, palmas de aceite, cereales y maderas industriales. Asombrosamente, un estudio reciente encontró que el área deforestada para cultivos agrícolas en la Amazonía se correlaciona (R²= 0,72) con el precio promedio anual de la soya (Morton *et al.*, 2006).

Degradación de ecosistemas

La producción de biocombustibles está agudizando la grave alteración que existe en el ciclo global del nitrógeno (Duce *et al.*, 2008; Galloway *et al.*, 2008). La actividad humana ha más que doblado el N-fijo que entra a los diferentes ecosistemas, causando una cascada de problemas ambientales y de salud pública (Galloway *et al.*, 2008). Los suelos de muchas regiones han sido acidificados y sus nutrientes minerales esenciales (e.g., Ca, K) lixiviados. Los cuerpos de aguas de estas regiones también se han acidificado y los ríos transportan tremendas cantidades de N y otros nutrientes a los estuarios y aguas costeras (Vitousek *et al.*, 1997), lo que promueve el crecimiento de algas y zooplancton. En el Golfo de México, debido a las descargas del río Mississippi, se ha producido una zona en la cual las aguas profundas contienen <2ppm de O₂ disuelto, creando un ambiente hostil para la vida marina (USGS, 2008). También es probable que esta masiva entrada de N ya haya causado una declinación de la pesca costera y acelerado la pérdida de biodiversidad en los ecosistemas terrestres y acuáticos (Vitousek *et al.*, 1997).

La rentabilidad de los biocombustibles está propiciando monocultivos intensivos y un abandono de la rotación de éstos, a pesar de que la biodiversidad influye en la productividad y estabilidad de los ecosistemas (Tilman *et al.*, 2006). Esto está auspiciando la erosión y degradación de los suelos, y el cultivo de maíz en Estados Unidos causaría más erosión que cualquier otro cultivo (Pimentel, 2003). En los agroecosistemas tropicales intensivos (e.g., caña de azúcar) el impacto en la productividad debido a la erosión es difícil de detectar en el corto plazo, pero esto ocurriría a largo plazo, ya que la velocidad de la erosión es mayor que la de formación del suelo (Sparovek y Schnug, 2001).

En resumen, dependiendo de las condiciones de producción/evaluación y la inclusión de compuestos climáticamente activos no contemplados en el Protocolo de Kyoto, los etanoles de maíz y caña de azúcar no producirían una reducción significativa de las emisiones de CO₂-eq, con respecto a la gasolina. Las posibles ventajas del etanol celulósico están en suspenso. La eventual utilización de suelos vírgenes produciría emisiones enormes de CO₂. Los monocultivos intensivos con alta fertilización estarían propiciando erosión de los suelos, contaminación de los cuerpos

de agua y disminución de la productividad y estabilidad de los ecosistemas.

Cultivos Genéticamente Modificados

Los organismos genéticamente modificados o manipulados (OGM) son organismos cuyo material genético ha sido alterado utilizando técnicas de ingeniería genética (IG). Moléculas de DNA de diferentes orígenes son combinadas *in vitro* para crear un nuevo gen. Este nuevo DNA es entonces transferido a un organismo que sería modificado.

La discusión de los riesgos y beneficios de los OGM está muy polarizada entre los grupos pro- y anti-biotecnología. Para unos la IG podría terminar con el hambre en el mundo y para otros podría dañar la salud y el ambiente. Los beneficios de la IG como el aumento de los rendimientos de los cultivos estarían más o menos a la vista, pero los riesgos (toxinas, alergias, nuevas enfermedades, invasión de cultivos) son más difíciles de descubrir. Un listado de 65 riesgos a la salud debido al consumo de alimentos GM en Estados Unidos ha sido presentado por Smith (2007). Sin embargo, una revisión de la literatura reveló que el conocimiento actual es incompleto, tanto para apoyar los riesgos como los beneficios de los OGM (Wolfenbarger y Phifer, 2000). Según estos autores faltan muchos experimentos claves.

La industria biotecnológica ve en los agrocombustibles una gran oportunidad para promover el uso de plantas GM. (Sticklen, 2008). Actualmente >60% del maíz plantado en Estados Unidos es GM (NASS, 2008), especialmente resistente a los insectos, pero las aspiraciones de la IG serían las de alterar la estructura fundamental, creando un maíz orientado a la producción de etanol (Pollack, 2006). Esto, sin duda, incrementará la polémica existente y la necesidad de hacer los estudios necesarios para evaluar los riesgos de los cultivos GM. Por ejemplo, un temor válido que se tiene acerca del desarrollo del etanol celulósico es que una vez que esta tecnología esté disponible podría propiciar inevitablemente la deforestación y plantación de monocultivos de árboles genéticamente manipulados, bajos en lignina y de alto rendimiento en etanol (Smolker *et al.*, 2007). Los árboles genéticamente manipulados podrían fácilmente contaminar los bosques nativos.

Emisión de Contaminantes en la Combustión del Etanol

Mezclas de etanol con gasolina (hasta ~20%; "gasohol") pueden ser usadas en los motores a gasolina actualmente en uso. Con el objeto de oxigenar la combustión y aumentar el octanaje, la mayoría de las gasolinas contienen ~5% de etanol (E5). El "gasohol" usado en la mayoría de los paí-

ses contiene 10% de etanol (E10) o menos. En Brasil, a finales de los 70s, fueron desarrollados motores que operan con puro etanol (etanol hidratado; 95,5GL). El programa brasileño de producción de etanol fue iniciado a principio de los años 70 como respuesta al embargo petrolero de esos años (Moreira y Goldemberg, 1999). Posteriormente se desarrollaron motores que operan con "combustible flexible" (*flex fuel*). Estos automóviles tienen incorporado un sensor que determina la mezcla gasolina/etanol presente en el tanque y ajusta la correspondiente operación del motor. Además de la mezcla E10, en varios estados de Estados Unidos y algunos países de Europa (e.g., Suecia) está disponible la mezcla E85, que contiene 85% de etanol. Los autos que operan con combustible flexible (sus características pueden ser consultadas en http://en.wikipedia.org/wiki/Flexible-fuel_vehicle y en <http://en.wikipedia.org/wiki/E85>) pueden indistintamente utilizar gasolina pura o las varias mezclas de etanol disponibles. Siendo el etanol corrosivo, las partes del vehículo que entran en contacto con el combustible han sido mejoradas para tolerarlo (tanques de acero inoxidable y tuberías recubiertas con teflón).

La emisión de contaminantes de la mezcla E85 ha sido ampliamente evaluada. De acuerdo a la revisión hecha por Jacobson (2006) hay una gran dispersión de las emisiones reportadas, pero en general existe cierto consenso en relación al aumento o disminución de las emisiones producidas, en comparación a cuando se usa gasolina (E5). La combustión de E85 aumentaría las emisiones de hidrocarburos reactivos (+15%), metano (+43%), formaldehído (+60%) y acetaldehído (+1900%), al tiempo que disminuyen las emisiones de NO (-32%), benceno (-80%), benzaldehído (-69%) y butadieno (-17%). Hay fuertes discrepancias en cuanto a las emisiones de CO y al parecer no existe una diferencia significativa entre el E85 y la gasolina. Las emisiones con menores porcentajes de etanol, muy probablemente estarán en el rango entre las emisiones del E85 y la gasolina (E5).

Riesgo de cáncer. En la combustión de E85 se disminuye las emisiones de los compuestos cancerígenos de benceno (sustancialmente) y de butadieno, pero se incrementan el acetaldehído (sustancialmente) y formaldehído. Al ponderar estas emisiones con la unidad estimada de riesgo de cáncer (CURE, de *cancer unit risk estimate*), el uso de E85 no presentaría ventaja alguna, con respecto a la gasolina, sobre el posible riesgo de cáncer de las emisiones de los vehículos (Jacobson, 2006).

Smog fotoquímico. Las emisiones de acetaldehído y formaldehído aumentan sustancialmente en la combustión de E85. Estos compuestos son importantes precursores de la formación de ozono presente en el smog fotoquímico

que sufren muchas ciudades alrededor del mundo. Además, el acetaldehído es el mayor precursor del peroxiacetilnitrato (PAN), un potente irritante ocular. Considerando que el ozono propicia el asma, la bronquitis y enfisemas, el empleo de E85 sería un riesgo mayor para la salud pública que la gasolina (Jacobson, 2007).

Resumiendo, el uso del etanol como combustible en los vehículos no presenta ventajas ambientales con respecto a la gasolina, sino más bien desventajas: no disminuye el riesgo de cáncer, aumentaría el smog fotoquímico en áreas urbanas y aumenta las emisiones de metano, un potente gas de invernadero.

Impacto Total a lo Largo del Ciclo de Vida del Agroetanol

Como se discute arriba, los supuestos beneficios ambientales de los agrocombustibles están bajo una creciente y severa evaluación. Existe consenso en que la comparación con los combustibles fósiles no debería restringirse solo a la emisión de gases de invernadero incluidos en el Protocolo de Kyoto. En general, comparados con los combustibles fósiles, los agrocombustibles tendrían un mejor desempeño "vientos abajo" de los surtidores de combustible (menor emisión de gases de invernadero), pero serían más dañinos al ambiente "vientos arriba" de los surtidores, durante su producción. La producción de biomasa para los agrocombustibles tiene una amplia variedad de efectos sobre la biodiversidad, calidad de los cuerpos de agua (debido al uso de fertilizantes y pesticidas), uso del agua, productividad y erosión de suelos.

El instituto de energía suizo (EMPA) realizó una evaluación ambiental en todo el ciclo de vida de los agrocombustibles, comparado con el correspondiente a los combustibles fósiles usados en transporte (Zah *et al.*, 2007). El impacto ambiental total fue calculado utilizando indicadores que miden el daño a la salud humana, degradación de ecosistemas, efecto sobre el clima, agotamiento de recursos naturales, etc., efectos que fueron incluidos en un indicador único denominado UBP. Los resultados indican que el impacto ambiental de la operación de los vehículos sería mayor cuando se utilizan combustibles fósiles; sin embargo, es más que compensado en muchos casos por los altos impactos ambientales de la producción agrícola de los agrocombustibles, en términos de acidificación de suelos, excesivo uso de fertilizantes, contaminación atmosférica por quemas agrícolas, toxicidad de los pesticidas y pérdida de biodiversidad. Entre otros, el UBP para la gasolina con bajo azufre es de ~200, el del etanol de caña de azúcar (Brasil) ~250, el del etanol de maíz (EEUU) ~510, el etanol de remolacha (China) ~220. El UBP de la

producción de metano por varios procesos es <200 y el del gas natural fósil es ~150. Como todavía no hay producción comercial, el estudio no incluyó al etanol celulósico.

Resumiendo, de acuerdo con el estudio suizo, el impacto total (e.g., salud, ecosistemas) de los agroetanolos que se utilizan actualmente sería superior al uso de gasolina, siendo especialmente alto el del etanol de maíz. El uso de gas natural en los vehículos sería ambientalmente el más favorable.

Impacto en los Precios de los Alimentos

Diez años después de la cumbre mundial sobre la alimentación, prácticamente no se ha avanzado en la consecución del objetivo de reducir a la mitad el número de personas malnutridas para 2015. En 2001-2003, según estimaciones de la FAO (2006) había todavía 854 millones de personas subnutridas a escala mundial: 820 millones en los países en desarrollo, 25 millones en los países en transición y 9 millones en los países industrializados.

El rápido crecimiento de la actual industria de los biocombustibles, a partir de cultivos alimenticios (maíz, caña de azúcar, trigo), compite fuertemente por tierras agrícolas y agua de riego. A escala global los biocombustibles representan una proporción significativa en la demanda de cultivos; en 2006 la proporción de maíz dedicada al agroetanol fue ~7%, y de caña fue ~17% (Fresco *et al.*, 2007). Según FAO (2008a) “La bioenergía presenta a la vez oportunidades y riesgos para la seguridad alimentaria. Podría revitalizar el sector agrícola, promover el desarrollo rural y reducir la pobreza, y al menos, mejorar el acceso rural a la energía sostenible. Pero si no se administra en forma sostenible podría representar una seria amenaza para la seguridad alimentaria al obstaculizar a algunos de los sectores más vulnerables y el acceso a los alimentos”.

En general, existe cierto consenso acerca de que la producción de biocombustibles ha influido en el aumento de los precios de los alimentos (Rosegrant *et al.*, 2006; Doornbosh y Steenblik, 2007, Müller *et al.*, 2007; FAO, 2008b), que probablemente se mantendrán creciendo durante la próxima década (Doornbosh y Steenblik, 2007; OECD/FAO, 2007). Entre 2005 y 2007 el azúcar aumentó 6%, 68% el maíz y 27% el trigo (Doornbosh y Steenblik, 2007; FAO, 2007). Estos aumentos no solo incluyen los alimentos utilizados para la producción de combustible, sino que también se han expandido a las carnes y vegetales (Borders y Burnett, 2007). Además, los inventarios han bajado (FAO, 2006). Para 2020 los precios dependerán de si las tecnologías de conversión de la celulosa entran en producción masiva alrededor del 2015 (Rosegrant *et al.*, 2006).

El Reportero Especial de los “Derechos a la Comida” de las Naciones Unidas, Jean Ziegler, ha solicitado una moratoria de la producción de agrocombustible con el objeto de hacerle frente a la escalada de precios de los alimentos. Según Ziegler (2007) “Usar la tierra para los agrocombustibles podría resultar en una masacre, ya que habría una disminución de los alimentos enviados a los países pobres”. Por su parte, en la reciente declaración de la conferencia de alto nivel sobre la seguridad alimentaria mundial (FAO, 2008b) se establece que “En consideración a las necesidades mundiales en materia de seguridad alimentaria, energía y desarrollo sostenible, resulta esencial afrontar los desafíos y las oportunidades que plantean los biocombustibles. Estamos convencidos de que son necesarios estudios en profundidad para asegurar que la producción y la utilización de biocombustibles sean sostenibles...”.

En la práctica, se concuerda que la forma de asegurar que un agrocombustible es sustentable, es a través de su certificación, basada en evaluaciones a lo largo de todo su ciclo de vida (Royal Society, 2008).

Potencial de Producción de Agrocombustibles

Junto con los discutibles beneficios ambientales, la producción de etanol tendría como objetivo disminuir la dependencia energética del petróleo. Sin embargo, las evaluaciones indican que la producción de biocombustibles líquidos es relativamente restringida. Solo muy pocos países tienen el potencial de producir biocombustibles en cantidades que sean significativas para disminuir la dependencia de la importación de petróleo (Doornbosh y Steenblik, 2007).

Etanol de cultivos alimenticios. El 2% del área cultivada a escala global se destina actualmente a producir caña de azúcar, sobre todo para la producción de azúcar en países tropicales. Manteniendo la producción de azúcar constante, se estima que para producir el equivalente del 10% de la gasolina consumida a escala global, habría que aumentar los cultivos de caña 2,5 veces (Goldemberg, 2007). Por su parte, en Estados Unidos, principal productor de etanol de maíz, para desplazar 5% de los combustibles fósiles líquidos se requiere más del 20% de las tierras de cultivo, se necesitarían todos los cultivos de maíz para desplazar el 12%, y para equipar todos los vehículos en EEUU con 100% de etanol se requeriría 97% de las tierras arables (Borders y Burnett, 2007). Por lo tanto, los estimados indican claramente que aun para reemplazar 10% de la gasolina por etanol de maíz y/o caña de azúcar, habría que desplazar otros cultivos y/o desmontar suelos vírgenes, con los consecuentes impactos sobre la producción de alimentos y el ambiente.

Combustibles a partir de celulosa. Varios reportes han examinado la disponibilidad potencial de tierras para producir biocombustibles a partir de celulosa (Fischer y Schrattenholzer, 2001; Hoogwijk *et al.*, 2003; Smeets *et al.*, 2006; Doornbosh y Steenblik, 2007). La disponibilidad adicional de tierra a escala global para el año 2050 sería de ~0,74Gha, de las cuales 0,3Gha son necesarias para el aumento de la producción de alimento, quedando 0,44Gha disponibles para producir biocombustibles (Doornbosh y Steenblik, 2007). El potencial de expansión está mayormente localizado en África y Sur y Centro América (~80%), con la mitad concentrada en siete países: Angola, República Democrática del Congo, Sudán, Argentina, Bolivia, Brasil y Colombia (Fisher *et al.*, 2006; Smeets *et al.*, 2006). En principio, la producción de agrocombustible traería un grupo más amplio de países al negocio de los combustibles líquidos, diversificando la oferta y disminuyendo los riesgos de interrupción de los suministros.

Por su parte, la energía total primaria en la biomasa a escala global en 2050, incluyendo los cultivos energéticos, convertible en biocombustible (principalmente etanol) sería ~255EJ/año: 44,5% en cultivos energéticos adicionales, 14,2% de residuos agrícolas, 37% de residuos forestales y 4,1% de desechos animales y orgánicos. Aplicando un optimista factor de conversión de 35%, se obtiene un potencial de producción de agrocombustible de ~43EJ/año para 2050 (Doornbosh y Steenblik, 2007). Esta energía corresponde al 23% de la demanda global de combustible líquido estimada para 2050 (IEA, 2006a). El Departamento de Energía de EEUU (Perlack *et al.*, 2005), estimó que ~1,3×10⁹ toneladas de biomasa seca estarían disponibles para producir 227×10⁹ litros de etanol celulósico, que correspondería a ~30% del combustible que se utiliza en transporte en ese país.

En resumen, el potencial de producción de agroetanol a partir de cultivos alimenticios y/o celulosa (aun no disponible) reconocido hasta el momento, sería muy restringido. Solo podría desplazar un porcentaje relativamente bajo (20-30%) de los combustibles líquidos obtenidos a partir del petróleo. A no ser que se logren rápidos cambios en la tecnología del transporte (autos eléctricos, hidrógeno como combustible) la dependencia de los combustibles fósiles se mantendrá por mucho tiempo. En todo caso, se diversificaría la actual oferta de combustibles líquidos.

Visión Sinóptica

Los agrocombustibles líquidos son una fuente renovable de energía, con balances netos de energía positivos, siendo especialmente alto el de caña de azúcar. Sin embargo, la sustentabilidad de los bio-

combustible producidos de cultivos alimenticios como maíz y caña de azúcar está cuestionada debido a los efectos/impactos ambientales (erosión, pérdida de biodiversidad, contaminación del aire y cuerpos de agua) y sociales (aumento del precio de los alimentos) producidos. Dependiendo de ciertas circunstancias y de los parámetros utilizados en la evaluación, los agroetanolos podrían estar contribuyendo en forma positiva al calentamiento global, efecto que se agudizaría al utilizar suelos vírgenes.

Muchos de los problemas de los actuales agrocombustibles podrían minimizarse con el advenimiento del etanol celulósico producido de desechos y/o cultivos energéticos, como pasto de caña, en suelos marginales y con baja fertilización, pero sus beneficios ambientales recaen en críticas hipótesis que deben ser cumplidas para que el etanol de celulosa sea sustentable.

En todos los casos, se requeriría de una certificación que demuestre la sustentabilidad del agrocombustible.

De cualquier forma, el potencial global de producción de agrocombustibles líquidos evaluado/reconocido actualmente es limitado y serían solo una solución parcial al reemplazo de los combustibles utilizados en transporte (gasolina, diésel). Progresos dirigidos hacia una solución sustentable para el transporte y la demanda de movilidad requieren una aproximación integral, combinando agrocombustibles sustentables con otros desarrollos que incluyan nuevo diseño de vehículos y motores, desarrollo de vehículos que no requieren combustibles líquidos, auspicio del transporte público, mejora de la planificación urbana/rural, y propiciar comportamientos tendientes a reducir la demanda de combustibles.

REFERENCIAS

- Audiencia (2007) *Hearing Examines Black Carbon and Global Warming*. Committee on Oversight and Government Reform. (<http://oversight.house.gov/story.asp?ID=1550>).
- Bond T (2007) Can warming particles enter global climate discussion? *Env. Res. Lett.* 2: 045030.
- Borders M, Burnett HS (2007) *The Environmental Cost of Ethanol*. Brief Analysis No 591. National Center for Policy Analysis. (www.ncpa.org/pub/ba/ba591/ba591.pdf)
- Butler R (2007) *Biofuels Driving Destruction of Brazilian Cerrado*. (<http://news.mongabay.com/2007/0821-cerrado.html>).
- Crutzen PJ, Mosier AR, Smith KA, Winiwarter W (2008) N₂O release from agro-biofuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuels. *Atm. Chem. Phys.* 8: 389-395.
- Doornbosh R, Steenblik R (2007) *Biofuels: Is the Cure Worse than the Disease?* Organization for Economic Cooperation and Development. (www.globalbioenergy.org/uploads/media/0709_OECD_BIOFUELS_IS_THE_CURE_WORSE_THAN_THE_DISEASE_01.pdf).
- Duce RA, LaRoche J, Altieri K, Arrigo KR, Baker AR, Capone DG, Cornell S, Dentener F, Galloway J, Ganeshram RS, Geider RJ, Jickells T, Kuypers MM, Langlois R, Liss PS, Liu SM, Middelburg JJ, Moore CM, Nickovic S, Osciles A, Pedersen T, Próspero J, Schlitzer R, Seitzinger S, Sorensen LL, Uematsu M, Ulloa O, Voss M, Ward B, Zamora L (2008) Impacts of atmospheric anthropogenic nitrogen on the open ocean. *Science* 320: 893-897.
- FAO (2006) *El Estado de Inseguridad Alimentaria en el Mundo 2006*. (www.fao.org/docrep/009/a0750s/a0750s00.htm)
- FAO (2007) *State of the World's Forests 2007*. (www.fao.org/docrep/009/a0773e/a0773e00.htm)
- FAO (2008a) *La Bioenergía y la Seguridad Alimentaria*. ([ftp://ftp.fao.org/nr/HLCinfo/Bioenergy-Infosheet-Sp.pdf](http://ftp.fao.org/nr/HLCinfo/Bioenergy-Infosheet-Sp.pdf))
- FAO (2008b) *Los Desafíos del Cambio Climático y la Bioenergía*. http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/foodclimate/HLCdocs/declaration-S.pdf
- Fargione J, Hill J, Tilman D, Polasky S, Hawthorne P (2008) Land clearing and the biofuel carbon debt. *Science* 319: 1235-1238.
- Farrell AE, Plevin RJ, Turner BT, Jones AD, O'Hare M, Kammen DM (2006) Ethanol can contribute to energy and environmental goals. *Science* 311: 506-508.
- Fischer G, Schratzenholzer L (2001) Global bioenergy potentials through 2050. *Biomass Bioenergy* 20: 151-159.
- Fischer G, Shah M, van Velthuisen H, Nachtergaele F (2006) *Agro-Ecological Zones Assessment*. RP-06-003. International Institute for Applied Systems Analysis. Laxenburg, Austria. 28 pp.
- Fresco LO, Dijk D, de Ridder W (2007) *Biomass, Food & Sustainability: Is There a Dilemma?* Rabobank, Holanda. (www.rabobank.com/content/images/Biomass_food_and_sustainability_tcm43-38549.pdf)
- Galloway JN, Townsend AR, Erisman JW, Bekunda M, Cai Z, Freney JR, Martinelli LA, Seitzinger SP, Sutton MA (2008) Transformation of the Nitrogen Cycle: Recent Trends, Questions, and Potential Solutions. *Science* 320: 889-892.
- Goldemberg J (2007) Ethanol for a sustainable energy future. *Science* 315: 808-810.
- Goldemberg J, Guardabassi P (2009) Are biofuels a feasible option? *Energy Policy* 37: 10-14.
- Goldemberg J, Coelho ST, Guardabassi P (2008) The sustainability of ethanol production from sugarcane. *Energy Policy*, 36: 2086-2097.
- Hansen MC, Stehman SV, Potapov PV, Loveland TR, Townshend JRG, DeFries RS, Pittman KW, Arunarwat B, Stolle F, Steiner MK, Carroll M, DiMiceli C (2008) Humid tropical forest clearing from 2000 to 2005 quantified by using multitemporal and multiresolution remotely sensed data. *Proc. Nat. Acad. Sci.* 105: 9439-9444.
- Hill J, Nelson E, Tilman D, Polasky S, Tiffany D (2006) Environmental, economic, and energetic costs and benefits of biodiesel and ethanol biofuels. *Proc. Nat. Acad. Sci.* 103: 11206-11210.
- Hoogwijk M, Faaij A, van den Broek R, Berndes G, Gielen D, Turkenburg W (2003) Exploration of the Ranges of the Global Potential of Biomass for Energy. *Biomass Bioenergy* 25: 119-133.
- IEA (2006a) *Energy Technologies Perspectives*. Ch. 5. Road Transport Technologies and Fuels. International Energy Agency. OECD. París, Francia. (www.iea.org/Textbase/publications/free_all.asp)
- IEA (2006b) *World Energy Outlook 2006*. Ch. 14. The Outlook for Biofuels. International Energy Agency. OECD, París, Francia. (www.iea.org/Textbase/publications/free_all.asp)
- Jacobson MZ (2006) Addressing global warming, air pollution health damage and long term energy needs simultaneously. (www.stanford.edu/group/efmh/jacobson/ClimateHealth4.pdf)
- Jacobson MZ (2007) Effects of ethanol (E85) versus gasoline vehicles on cancer and mortality in the United States. *Env. Sci. Technol.* 41: 4150-4157.
- Macedo IC, Leal MRLV, da Silva JEAR (2004) Assessment of greenhouse gas emissions in the production and use of fuel ethanol in Brazil. http://www.unica.com.br/ri_pages/files/pdf_in-gles.pdf
- Makower J, Pernick R, Wilder C (2007) *Clean Energy Trends 2007*. (www.cleaneedge.com/reports/Trends2007.pdf)
- Moreira JR, Goldemberg J (1999) The alcohol program. *Energy Policy* 27: 229-245.
- Morton D, DeFries RS, Shimabukuro YS, Anderson LO, Arai E, del Bon-Esperito-Santo F, Freitas R, Morisette J (2006) Cropland expansion changes deforestation dynamics in the southern Brazilian Amazon. *Proc. Nat. Acad. Sci.* 103: 14637-14641.
- Müller A, Schmidhuber J, Hoogeveen J, Steduto P (2007) Some insights in the effect of growing bioenergy demand on global food security and natural resources. *Conferencia Internacional Linkages between Energy and Water Management for Agriculture in Developing Countries*. Hyderabad, India. http://www.globalbioenergy.org/uploads/media/0701_FAO_Mueller_-_Some_insights_in_the_effect_of_growing_bioenergy_demand_on_global_food_security_and_natural_resources_01.pdf
- NASS (2008) *GE Corn Varieties Spreadsheet*. National Agricultural Statistics Service. (www.ers.usda.gov/Data/BiotechCrops/alltables.xls).
- OECD/FAO (2007) *OECD-FAO Agricultural Outlook. Database (2007-2016)*. Organisation for Economic Co-operation and Development. (www.oecd.org/document/53/0,3343,en_2825_4_94504_39550901_1_1_1_1,00.html).
- Perlack RD, Wright LL, Turhollow AF, Graham RL, Stokes, BJ, Erbach DC (2005) *Biomass as Feedstock for Bioenergy and Bioproducts Industry: The Technical Feasibility of a Billion-Ton Annual Supply*. Reporte para Oak Ridge National Laboratory. 78 pp. http://feedstockreview.ornl.gov/pdf/billion_ton_vision.pdf
- Pimentel D (2003) Ethanol fuels: Energy balance, economics, and environmental impacts are negative. *Nat. Resour. Res.* 12: 127-134.
- Pimentel D (2005) Weighing in on renewable energy efficiency. *Geotimes* 50: 18
- Pollack A (2006) Redesigning crops to harvest fuel. *The New York Times*. Sept. 8, 2006.
- Righelato R, Spracklen V (2007) Carbon mitigation by biofuels or by saving and restoring forests? *Science* 317: 902.
- Rosegrant MW, Msangi Sulser T, Valmonte-Santos R (2006) Biofuel and the global food balance. International Food Policy Research Institute. http://www.ifpri.org/2020/focus/focus14/focus14_03.pdf
- Royal Society (2008) *Sustainable Biofuels: Prospect and Challenges*. Policy Document 01/08. The Royal Society. Londres, RU. 90 pp. (<http://royalsociety.org/document.asp?latest=1&id=7366>).
- Rypdal K, Fuglestedt JS (2005) Ozone and particles in environmental agreements. Should ozone and particles be regulated in climate or air quality agreements? *Cicerone* 1-2005. Center

- for International Climate and Environmental Research-Oslo (CICERO). (www.cicero.uio.no/fulltext/index_e.aspx?id=3490).
- Sanhueza E (2009) Potential emissions of Kyoto and non-Kyoto climate active compounds in the production of sugarcane ethanol. *Interciencia* 34: 8-16.
- Schmer MR, Vogel KP, Mitchell RB, Perrin RK (2008) Net energy of cellulosic ethanol from switchgrass. *Proc. Nat. Acad. Sci.* 105: 464-469.
- Searchinger T, Heimlich R, Houghton RA, Dong F, Elobeid A, Fabiosa J, Tokgoz S, Hayes D, Yu TH (2008) Use of U.S. croplands for biofuels increase greenhouse gases through emissions from land use change. *Science* 319: 1238-1240.
- Service RF (2007) Cellulosic ethanol: Biofuel researchers prepare to reap a new harvest. *Science* 315: 1488-1491.
- Smets E, Faaij A, Lewandowski I, Turkenburg (2006) A bottom up assessment and review of global bio-energy potentials to 2050. *Progress in Energy and Combustion Science* 33: 56-106.
- Smith JM (2007) *Genetic Roulette: The Documented Health Risks of Genetically Engineered Foods*. (www.seedsofdeception.com/Public/AboutGeneticallyModifiedFoods/TestimonytoEPA-May2007/index.cfm)
- Smolker R, Tokar B, Petermann A, Hernandez E (2007) The real cost of agrofuels: Food, forest and the climate. Reporte de la Global Forest Coalition. <http://www.globalforestcoalition.org/img/userpics/File/publications/Therealcostofagrofuels.pdf>
- Sparovek G, Schnug E (2001) Temporal erosion-induced soil degradation and yield loss. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 1479-1486.
- Sticklen MB (2008) Plant genetic engineering for biofuel production: towards affordable cellulosic ethanol. *Nature Rev. Genet.* 9: 433-443.
- Tilman D, Reich PB, Knops JMH (2006) Biodiversity and ecosystem stability in a decade-long grassland experiment. *Nature* 441: 629-632.
- USGS (2008) *The Gulf of Mexico Hypoxic Zone*. U.S. Geological Survey. (http://toxics.usgs.gov/hypoxia/hypoxic_zone.html).
- Vitousek PM, Aber J, Bayle SE, Howarth RW, Likens GE, Matson PA, Schindler DW, Schlesinger WH, Tilman GD (1997) Human alteration of the global nitrogen cycle: Causes and consequences. *Ecol. Iss.* 1: 1-15.
- Wang M, Wu M, Huo H (2007) Life-cycle energy and greenhouse gas emission impacts of different corn ethanol plant types. *Env. Res. Lett.* 2: 1-13.
- Wolfenbarger LL, Phifer PR (2000) The ecological risks and benefits of genetically engineered plants. *Science* 290: 2008-2092.
- Worldwatch Institute (2006) *Biofuels for Transport: Global Potential and Implication for Energy and Agriculture*. Worldwatch Institute. Washington, EEUU. 162 pp. (www.worldwatch.org/node/5303).
- Zah R, Böni H, Gauch M, Hirschler R, Lehmann M, Wäger P (2007) *Life Cycle Assessment of Energy Products: Environmental Assessment of Biofuels*. Materials Science & Technology Federal Office for Energy (EMPA). Berna, Suiza. 161 pp.
- Ziegler J (2007) *Special Report on the Right to Food to the UN General Assembly*. 62nd session. (www.swissinfo.org/eng/front/detail/UN_rapporteur_calls_for_biofuel_moratorium.html?siteSect=105&sid=8305080&cKey=1192127505000&ty=st).

AGROETHANOL AN ENVIRONMENTAL FRIENDLY FUEL?

Eugenio Sanhueza

SUMMARY

Concerns about energetic security and climate change have driven the present boom of agrofuels. Unfortunately, their development occurs before appropriate environmental impact studies have been made and a strong debate has been generated. The main arguments against agroethanol are reviewed herein. Agrofuels have a positive net energy balance; for sugarcane ethanol it is ~8 while for corn ethanol it is <1.5; in theory, cellulosic ethanol may reach up to 36. CO₂ emitted by bioethanol combustion does not count as a greenhouse gas; however, during its production such gases are emitted. In the production of corn ethanol there is only a small saving of emissions. The reduction with sugarcane ethanol is very favorable when only gases included in the Kyoto Protocol are considered; however, when other climate active compounds are considered, CO₂-eq emission would

surpass that produced by equivalent amounts of gasoline. Agroethanol production promotes the transformation of natural soils, with loss of biodiversity and enormous CO₂ emissions. Intensive mono-crops promote erosion, pollute waters and decrease productivity and stability of ecosystems. Agrofuels compete for arable soils and are, in part, responsible for food price increases. The polemics about genetically engineering organisms will be exacerbated with the increased use of agrofuels. Ethanol combustion in vehicles presents some disadvantages to gasoline, does not decrease cancer risk, increases photochemical smog in cities and increases methane emission. The eventual arrival of cellulosic ethanol could improve the situation. However, the present production potential could only replace a small percentage of liquid fossil fuels, maintaining oil dependence.

AGROETANOL ¿UM COMBUSTIVEL AMBIENTALMENTE AMIGÁVEL?

Eugenio Sanhueza

RESUMO

A preocupação pela segurança energética e a mudança climática impulsionam o uso dos agrocombustíveis, cujo desenvolvimento se adiantou às avaliações ambientais, gerando-se uma calorosa polémica. Aqui são revisados os principais questionamentos feitos ao agroetanol. Os agrocombustíveis têm um balanço energético neto positivo; para o etanol de cana de açúcar é ~8 e para o do milho é <1,5; na teoria, o do etanol celulósico poderia chegar a 36. O CO₂ emitido na combustão do bioetanol não conta como gás-estufa, mas durante sua produção são gerados tais gases. Ao produzir etanol de milho haveria alguma economia de emissões; com a cana, a redução de emissões contempladas no Protocolo de Kyoto é muito favorável, mas ao considerar compostos não incluídos naquele, as emissões de CO₂-eq sob certas condições de produção sobrepassariam as da

gasolina. A produção de agroetanol propicia a transformação de solos virgens, com perda de biodiversidade e enormes emissões de gases-estufa; os monocultivos intensivos propiciam erosão, contaminam águas e diminuem a produtividade e estabilidade de ecossistemas. A concorrência por terras aptas para o arado aumentaria preços de alimentos e a polémica sobre organismos geneticamente manipulados se agudizará com o auge dos agrocombustíveis. A substituição de gasolina veicular por etanol não diminuiria o risco de câncer, aumentaria o smog fotoquímico urbano e as emissões de metano. O etanol de celulosa atenuaria os questionamentos ambientais ao agroetanol de cultivos alimentícios, mas o potencial atual de produção deslocaria pouco combustível fóssil, mantendo-se uma alta dependência do petróleo.