

¿Es sustentable la producción de agrocombustibles a gran escala? El caso del biodiesel en Argentina

Is it sustainable the production of biofuels in large scale? The case of biodiesel in Argentina.

IERMANÓ, Maria José¹; SARANDÓN, Santiago Javier².

¹ Universidad Nacional de La Plata, Buenos Aires, Argentina, mariajoseiermano@gmail.com; ² Universidad Nacional de La Plata, Buenos Aires, Argentina, sarandon@ceres.agro.unlp.edu.ar.

RESUMEN

La posibilidad de agotamiento del petróleo ha llevado a la búsqueda de energías alternativas. Sin embargo, la evaluación de su producción a gran escala requiere un análisis que permita dimensionar sus consecuencias para la sustentabilidad de los agroecosistemas. Con este fin, se analizó el requerimiento de superficie y la eficiencia energética de la producción de biodiesel en Argentina, a partir de soja, colza, algodón y girasol. La eficiencia energética fue menor a 1 en soja y algodón, alrededor de 1 en colza y un poco mayor a la unidad en girasol. La superficie necesaria para producir el biocombustible necesario para el país duplica la superficie actualmente sembrada con cultivos anuales. Esto implica un avance de la frontera agrícola o el cambio de patrón de uso actual, con consecuencias ambientales y sociales negativas. En conclusión, bajo el modelo de agricultura de altos insumos, no es posible que el biodiesel sustituya completamente al gasoil, dado que es ecológica y socioeconómicamente desfavorable a largo plazo y genera graves consecuencias que atentan contra la sustentabilidad.

PALABRAS CLAVE: agroecología, agrocombustibles, agroecosistemas, eficiencia energética.

ABSTRACT

The possibility of fossil fuels exhaustion has led to search for sources of alternative energy, based on renewable resources. In Argentina, biodiesel is considered the most favorable alternative due to high levels of production of oil seed crops. Nevertheless, the evaluation of the production of biofuel at great scale requires a holistic analysis to evaluate its consequence for agroecosystems sustainability. Crop surface demand and energetic efficiency of biodiesel production with soybean, oilseedrape, cotton and sunflower crops were evaluated. The energetic efficiency was very lower than 1 in soybean and cotton crops, near 1 in oilseed rape and slightly higher than 1 in sunflower. The crop surface need to produce all the necessary biodiesel for fulfill our country demand is twofold the actual annual crop surface. This implies the expansion of the agricultural frontier or the change in land use patterns with negative environmental and social consequences. In conclusion, under the actual agriculture model, based on high inputs it is not possible that biodiesel can replace fossil fuels because it is not sustainable in a long time.

KEY WORDS: agroecology, biofuel, agroecosystems, energetic efficiency.

Correspondências para: mariajoseiermano@gmail.com; sarandon@ceres.agro.unlp.edu.ar
Aceito para publicação em 08/05/2009

Introducción

La creciente demanda mundial de energía ha motivado la búsqueda de sustitutos del petróleo, entre los cuales los derivados de la biomasa han recibido especial atención por varios autores (WOLF *et al.*, 2003, GIAMPIETRO *et al.*, 1997, BHATTACHARYA *et al.*, 2003), con resultados contradictorios e inciertos. Los llamados "agrocombustibles" están siendo considerados como reemplazantes del petróleo y como una importante fuente de agronegocios. Latinoamérica es considerada como el principal abastecedor de agrocombustibles, pues tiene recursos naturales y mano de obra disponibles para su explotación. Sin embargo la expansión de los monocultivos para agrocombustibles puede acrecentar el riesgo para la producción de alimentos y la supervivencia de las comunidades rurales. En la Argentina, se ha planteado que el país tiene las condiciones ideales para la producción de biocombustibles (UGOLINI, 2003). Sin embargo, esto plantea un importante conflicto entre la producción de alimentos y la de combustibles, por el uso de la tierra y el destino de los granos.

En la producción de agrocombustibles, el aumento del rendimiento o productividad de los cultivos no resulta un objetivo válido, ya que lo que se pretende es "cosechar energía". El problema es que se requiere energía para transformar los ecosistemas en agroecosistemas. Mas aún, el modelo agrícola moderno, intensivo y altamente productivo, se basa en el uso de elevadas cantidades de insumos derivados del petróleo (energía cultural), en forma de aportes directos de combustibles e indirectos para la producción de agroquímicos, fertilizantes, maquinaria y semillas (GLIESSMAN, 2001; FLORES & SARANDÓN, 2005). En algunos sistemas, la proporción de energía renovable representa sólo un 7 a 16% de la energía primaria total utilizada, mostrando la alta dependencia de energía no renovable de los modelos intensivos de agricultura (GRÖNROSS *et al.*, 2006). Es por esta razón que la eficiencia en el

uso de la energía en los agroecosistemas, especialmente en lo concerniente a los combustibles fósiles (no renovables), se ha propuesto como un indicador de la sustentabilidad (PIMENTEL *et al.*, 1991; OZKAN *et al.*, 2004). La eficiencia energética, entendida como unidades de energía cosechada por cada unidad de energía suministrada, ha sido analizada en diversos sistemas de producción (OZKAN *et al.*, 2004; FLORES *et al.*, 2004), mostrando, en muchos casos, valores cercanos a la unidad o aún menores. Esto señala la dificultad de intentar "cosechar energía" mediante la agricultura.

Se considera como hipótesis que 1) El reemplazo del combustible fósil por los agrocombustibles es ecológica y socio económicamente desfavorable a largo plazo y genera graves consecuencias que atentan contra la sustentabilidad de los agroecosistemas y las comunidades rurales; 2) Bajo el modelo de agricultura convencional, de altos insumos, no es posible, energéticamente, la producción sustentable de agrocombustibles.

Los objetivos de este trabajo son: 1) Evaluar la superficie necesaria y 2) la eficiencia energética de la producción de biodiesel a gran escala en la Argentina, a partir de 4 cultivos: colza, girasol soja y algodón y 3) analizar, desde un enfoque agroecológico, las consecuencias en el uso de la tierra y la viabilidad del modelo agrícola convencional para la sustentabilidad de esta propuesta.

Materiales y métodos

Se tomó como ejemplo la producción de biodiesel en Argentina, que, por su clima templado, centra su producción en el cultivo de granos, principalmente oleaginosos. Se realizaron cálculos en base a los cultivos de algodón, colza, girasol y soja, en la República Argentina. La soja y el girasol son las oleaginosas más importantes del país, tanto por sus valores de producción

¿Es sustentable la producción de

como por los de superficie sembrada, lo cual hace que se las enuncie como la principal materia prima a utilizar en la producción a gran escala. El algodón es interesante porque la semilla es un subproducto de la industria textil. Finalmente, la colza, aunque sembrada en poca superficie, es la oleaginosa más usada en la producción de biodiesel europea, lo cual la señala como una interesante alternativa a tener en cuenta para la producción de biodiesel en la Argentina.

Cálculo de la superficie necesaria para cubrir la demanda nacional de biodiesel

A partir de los datos sobre la demanda de diesel de petróleo a nivel nacional (UGOLINI, 2003) y, teniendo en cuenta la diferencia de poder calórico de ambos combustibles ($32,61 \text{ MJ L}^{-1}$ de BD vs. $36,57 \text{ MJ L}^{-1}$ de gasoil) (LENOIR, 2003), se calculó la demanda nacional de biodiesel como (**Demanda de BD** = Demanda nacional de gasoil / 0,89). Posteriormente, se calcularon los litros de biodiesel obtenidos por tonelada de grano, utilizando el rendimiento industrial promedio de la extracción de aceite (R E Aceite) (CORRADINI, 2001), el rendimiento industrial de la elaboración de biodiesel (R P Biodiesel) y el valor de densidad del biodiesel como factor de conversión de toneladas a litros. El R P Biodiesel se obtuvo tomando como datos los factores de conversión presentados por CORRADINI (2001) que relacionan los litros de biodiesel obtenidos a partir de 1 Kg. de grano.

L de BD obtenido por t de grano = R E Aceite x R P Biodiesel / 0,878.10-3 t L-1 BD

El rendimiento industrial de la extracción de aceite (R E Aceite) es de 0,20 para algodón, 0,40 para colza, 0,41 para el girasol y 0,18 para la soja; mientras que el rendimiento industrial de la producción de Biodiesel (R P Biodiesel) es de 0,65 para algodón, 0,66 para colza, 0,65 para el girasol y 0,61 para la soja (CORRADINI, 2001).

Con los litros de biodiesel por tonelada de

grano multiplicados por el rendimiento nacional promedio de cada cultivo para la campaña 2006/2007, se obtuvieron, para cada oleaginosa, los litros de biodiesel por unidad de superficie en 1 año (Litros de BD obtenido por ha = L BD t^{-1} grano x Rendimiento nacional promedio). La superficie sembrada nacional en la campaña 2006/07 (SAGPYA, 2008a) para los cultivos de algodón, colza, girasol y soja fue de 309.194 ha, 10.531 ha, 2.446.488 ha, 16.134.000 ha respectivamente, con un rendimiento promedio de $1,4 \text{ t ha}^{-1}$; $1,5 \text{ t ha}^{-1}$; $1,5 \text{ t ha}^{-1}$; $3,0 \text{ t ha}^{-1}$. respectivamente. Con este último dato y con la demanda nacional de biodiesel, se calculó la superficie requerida para cubrir el 100% de la demanda nacional del biocombustible.

Superficie requerida BD 100 = demanda de Biodiesel / L BD ha^{-1} .

Cálculo de la eficiencia energética

Se calculó la eficiencia energética como la energía obtenida por unidad de energía invertida, teniendo en cuenta los gastos directos de energía, tales como el combustible derivado de energía fósil, y la energía asociada a la fabricación de los insumos (maquinarias, fertilizantes, pesticidas) utilizados en dicho sistema (GLIESSMAN, 2001). No se tuvo en cuenta la energía solar.

Eficiencia Energética = Energía de Salida / Energía de Entrada

Para calcular la eficiencia energética todas las entradas y salidas fueron convertidas en unidades equivalentes (MJ) por medio de tablas de diferentes autores (ZENTNER, 2004; BORIN, 1997; HERNANZ *et al.*, 1995; CLEMENTS *et al.*, 1995). Se calculó como salida, el valor energético contenido en el grano de cada cultivo a partir de multiplicar el contenido de proteínas, hidratos de carbono y grasas por el equivalente energético de cada uno (SMITH, 1974).

Tabla 1: Coeficientes energéticos de cada insumo según varios autores.

Insumo	Valor energético	Unidad	Autor	Insumo	Valor energético	Unidad	Autor
cíncel	28,7	MJ/ha	1	calcio	0,1	MJ/kg	4
combustible	44	MJ/l	2	fósforo	14	MJ/kg	3
cosechadora	83,9	MJ/ha	3	nitrógeno	75,63	MJ/kg	2
cultivador	17,3	MJ/ha	1	potasio	8,47	MJ/kg	5
escardillo	17,3	MJ/ha	1	acefato	355	MJ/l	3
fertilizadora	3,7	MJ/ha	3	acetoclor beta	465	MJ/l	5
pulverizadora	15,11	MJ/ha	2	cliflutrina	355	MJ/l	3
rastra de discos	54,73	MJ/ha	2	cipermetrina	355	MJ/l	3
rastra doble acción	13	MJ/ha	2	curasemilla defoliante	355	MJ/l	3
rastra discos	44,8	MJ/ha	1	thidiazuron	270	MJ/l	1
rolo	13	MJ/ha	2	dicamba	336	MJ/l	2
sembradora gl	51,7	MJ/ha	2	diuron	270	MJ/l	1
sembradora gg	51,7	MJ/ha	2	endosulfan	355	MJ/l	3
sembradora SD	69,32	MJ/ha	2	glifosato	511	MJ/l	2
semilla de algodón	20,46	MJ/kg	6	MSMA	185	MJ/l	3
semilla de colza	24,18	MJ/kg	6	spinosad	355	MJ/l	3
semilla de girasol	23,04	MJ/kg	6	triflurofon	355	MJ/l	3
semilla de soja	22,93	MJ/kg	6	trifluralina	167	MJ/l	2
azulre	1,12	MJ/kg	2	twinn pack I	185	MJ/l	3

1- Clements *et al* (1995); 2- Zentner *et al* (2004); 3- Hernanz *et al* (1995); 4- Torres Campos *et al* (2004); 5- Borín (1997); 6- Elaboración propia.

El cálculo de la eficiencia energética fue desglosado en tres procesos: 1) Eficiencia energética del cultivo (E1), que abarca desde las labores de preparación de la cama de siembra hasta la cosecha de los granos; 2) Eficiencia energética del proceso de extracción de aceite (E2), que comprende la obtención de aceite a partir de los granos procedentes de la etapa 1; y 3) Eficiencia energética del proceso de transformación del biodiesel (E3) que consiste en la obtención del combustible a partir del aceite obtenido en la etapa 2. La E3 corresponde a la Eficiencia Final (EF), es decir, a la eficiencia energética de la producción de biodiesel desde la producción de materia prima hasta la obtención del biocombustible.

Se realizó el análisis energético de la etapa E1 por ser el proceso agronómico. En estos cálculos

no se tuvo en cuenta la energía necesaria para el transporte y almacenamiento de la cosecha. El análisis de los cuatro cultivos seleccionados se realizó a partir de los paquetes tecnológicos usualmente empleados en Argentina, en base a los Márgenes Brutos presentados por el INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria) (2006), SAGPYA (2008a) y AACREA (Asociación Argentina de Consorcios Regionales de Experimentación Agrícola) (2006), entre otros. Se usaron los rendimientos promedio de las zonas para la que se desarrolló el planteo técnico, obtenidos de las estadísticas de la SAGPYA para la campaña 2004/05. Las eficiencias energéticas de las etapas 2 y 3 se estimaron a partir de la eficiencia energética del proceso agronómico, utilizando para el cálculo los valores de rendimiento industrial, por lo que los resultados no

¿Es sustentable la producción de

incluyen los gastos de energía asociada en estas etapas.

Se tomó como zona de referencia para el cultivo de algodón la Provincia de Chaco, cuyo rendimiento en grano promedio es $0,91 \text{ t ha}^{-1}$. Los cultivos de colza y girasol tienen como zona de referencia el sudeste bonaerense, con un rendimiento promedio de $1,5$ y $2,2 \text{ t ha}^{-1}$ respectivamente. Para la soja se tomó el sur de Santa Fe/norte de Buenos Aires, con un rendimiento promedio de la zona de 3 t ha^{-1} .

La energía invertida se agrupó en cinco rubros de insumos: maquinaria, combustible, semilla, fertilizantes y plaguicidas. Dado que un manejo sustentable requiere mantener la base de recursos naturales, entre ellos la dotación de nutrientes del suelo, se consideró que la reposición (mediante la fertilización), de los nutrientes exportados en la cosecha es una condición indispensable para que esta alternativa sea viable en el largo plazo. Así, se analizaron dos situaciones: una con fertilización convencional y otra con reposición de nutrientes de acuerdo a la cantidad extraída según datos de contenido en el grano (fertilización de reposición). Se tuvo en cuenta la cantidad de N, P, K, S y Ca extraída con el grano. En el caso de la soja, el porcentaje de N en grano se afectó por un

coeficiente de 0,6, pues se considera que, del total de N, un 40% proviene de la fijación biológica (ANDRADE & SADRAS, 2000). Luego esos valores fueron afectados por un porcentaje correspondiente a la eficiencia de aplicación de los elementos, tomando un valor de 100% para P, K, S y Ca, y de 80% para N debido a su elevada movilidad en el suelo. El valor de rendimiento de los cultivos, en la situación de fertilización de reposición, se consideró igual al caso del planteo convencional.

Resultados

Superficie necesaria para cubrir la demanda nacional de biodiesel

Para satisfacer con biodiesel la demanda nacional de gasoil, se requiere sembrar $66,7 \times 10^6$ ha de algodón o $30,0 \times 10^6$ ha de girasol (tabla 2). Producirlo mediante el cultivo de soja y colza requiere una superficie de 36,5 y 30,7 millones de hectáreas, respectivamente.

Cubrir la demanda sólo del gasoil para uso agropecuario, requiere sembrar $11,0 \cdot 10^6$ ha de girasol, $13,4 \cdot 10^6$ ha de soja o $24,5 \cdot 10^6$ ha de algodón en el otro extremo. Esta superficie, debería agregarse a la superficie nacional implantada con cultivos anuales.

Tabla 2: Cantidad de biodiesel equivalente a la demanda de gasoil ($L \cdot 10^6$) para la República Argentina, según distintos rubros y requerimientos de superficie para la producción

RUBRO	DEMANDA DE GASOIL	DEMANDA DE BIODIESEL	CULTIVO			
			ALGODON	COLZA	GIRASOL	SOJA
Transporte de cargas	5.000	5.600	27.239	12.550	12.266	14.912
Sector Agropecuario	4.500	5.040	24.515	11.295	11.039	13.421
Automotores diesel	1.700	1.904	9.261	4.267	4.171	5.070
Transporte urbano de pasajeros	830	929	4.522	2.083	2.037	2.475
Transporte interurbano de pasajeros	210	235	1.144	527	515	626
TOTAL	12.240	13.708	66.680	30.722	30.027	36.504

Fuente: construido en base a datos de la SAGPyA y de Ugolini, 2002.

Si sólo se toma en cuenta la demanda total de biodiesel de acuerdo al porcentaje de corte del 5% (Ley de Biocombustibles), el requerimiento para producir la materia prima sería de $1,8 \cdot 10^6$ ha de soja, lo que representa el 11% de la superficie sembrada actual.

La cantidad de biodiesel producido por hectárea de cultivo estuvo directamente relacionada con el contenido de aceite en el grano y el rendimiento del cultivo por unidad de superficie. El mejor valor de producción de biodiesel con relación al resto de los cultivos analizados se observó en el girasol (455 L ha^{-1}), que conjugó un buen porcentaje de aceite y rendimiento en grano; la soja alcanzó valores medios (375 L ha^{-1}), pues, con el alto rendimiento, compensó el bajo valor de aceite en grano.

Eficiencia energética

El algodón y la soja presentaron valores de eficiencia energética final (E3) menores a 1, indicando que se cosechó menos energía (como biodiesel) que la que se invirtió en su obtención (tabla 3). La colza apenas superó la unidad. El girasol fue el cultivo más eficiente, ya que alcanzó un valor final de 3.

Se encontraron diferencias entre los distintos cultivos en relación con la inversión de energía, según el tipo de fertilización. La eficiencia energética disminuyó cuando se incluyó el agregado de los nutrientes necesarios para compensar la extracción del grano (fr). Tanto el algodón como la soja mostraron elevadas diferencias relativas, pues la fertilización en la situación convencional fue nula o muy baja en relación a las cantidades extraídas.

La eficiencia energética de la etapa agronómica (E1) fue superior a 1 en todos los cultivos, que mostraron variaciones en la incidencia energética de los insumos analizados. En algodón, el combustible fue responsable de la mitad de los ingresos totales de energía (51,2%), debido, principalmente, al elevado número de labores efectuadas en la preparación de la cama de siembra (tabla 4). El grupo que siguió en importancia energética fue el de los plaguicidas con un valor de 34,6%. Cuando se incluyó el agregado de los nutrientes necesarios para reponer lo extraído por el cultivo, éstos representaron un 30,8% de la energía invertida, mientras que el combustible y los plaguicidas disminuyeron su incidencia.

Tabla 3: Valores de eficiencia energética para la etapa agrícola (E1) y las etapas industriales (E2 y E3), con fertilización convencional (f conv) y con fertilización de reposición (fr).

	Algodón		Colza		Girasol		Soja	
	f conv	fr	f conv	fr	f conv	fr	f conv	fr
Energía de entrada (MJ/ha)	6003	8706	6984	8785	4064	4634	8226	21997
Energía de salida (MJ/ha)	18619	18619	36270	36270	50688	50688	62280	62280
E1	3,1	2,14	5,19	4,13	12,47	10,94	7,57	2,83
E2	0,4	0,28	2,08	1,65	5,11	4,48	1,36	0,51
E3 = E Final	0,26	0,18	1,37	1,09	3,32	2,92	0,83	0,31
Disminución de la eficiencia $[(f_c - f_r) / f_c] \cdot 100$	30,8		20,4		12		62,2	

¿Es sustentable la producción de

Tabla 4: Cálculo de las entradas de energía para el cultivo de algodón bajo fertilización convencional y fertilización de reposición. Valores entre paréntesis señalan el porcentaje de energía total, gastada en cada rubro de insumos.

Algodón		Valor energético: 20,16 MJ Kg. ⁻¹ grano				
Insumos	Fertilización Convencional			Fertilización de Reposición		
	Cantidad u ha ⁻¹	Energía Total	E Entrada (MJ ha ⁻¹)	Cantidad u ha ⁻¹	Energía Total	E Entrada (MJ ha ⁻¹)
Maquinaria			444 (7,4%)			448 (5,1%)
Círcel	1	28,7		1	28,7	
Rastra discos	1	44,8		1	44,8	
R discos DA	2	109,5		2	109,5	
Rastra dientes	1	13,0		1	13,0	
Cultivador	3	51,9		3	51,9	
Sembradora	1	51,7		1	51,7	
Pulverizadora	4	60,4		4	60,4	
Fertilizadora	0	0		1	3,7	
Cosechadora	1	83,9		1	83,9	
Combustible (L ha⁻¹)	69,87	3074,3	3074 (51,2%)	70,31	3093,6	3094 (35,5%)
Semilla (Kg. ha⁻¹)	20	409,2	409 (6,8%)	20	409,2	409 (4,7%)
Fertilizante (Kg. ha⁻¹)			0 (0%)			2680 (30,8%)
Nitrógeno	0			33,1	2503,4	
Fósforo	0			8	112,0	
Potasio	0			7,6	64,4	
Azufre	0			0	0	
Calcio	0			2,5	0,3	
Plaguicidas (L ha⁻¹)			2076 (34,6%)			2076 (23,9%)
Duron	2,1	567,0		2,1	567,0	
Acetoclor	1	465,0		1	465,0	
MSMA	0,6	111,0		0,6	111,0	
Acetato	0,2	71,0		0,2	71,0	
Thidiazuron	0,18	48,6		0,18	48,6	
Trilumaron	0,1	35,5		0,1	35,5	
Beta ciflutrina	0,15	53,3		0,15	53,3	
Endosulfan	2	710,0		2	710,0	
Spinosad	0,04	14,2		0,04	14,2	
			6003 (100%)			8706 (100%)

En el cultivo de colza, los fertilizantes fueron responsables de más de la mitad de los ingresos totales de energía, con valores que representaron entre un 60% y 70% del total de energía invertida (tabla 5). A este valor le siguió el grupo del combustible (27,5% y 21,9%). Ambas situaciones fueron similares debido a que en el planteo de fertilización convencional se efectúa una

incorporación elevada de nutrientes.

En girasol, el combustible fue responsable de aproximadamente la mitad de la energía usada, mientras que los plaguicidas tuvieron una incidencia de alrededor del 15% (tabla 6). Pero, en la situación de fertilización para reposición, los fertilizantes aumentaron su incidencia, de un 16,2% a un 26%.

El caso de la soja, por su sistema de labranza (siembra directa) gastó muy poco combustible y, por lo tanto, éste representó un bajo valor en el conjunto (Tabla 7). Por el contrario, se observó un elevado gasto energético en plaguicidas (53,8%), debido al elevado uso de herbicidas. Cuando se repusieron los nutrientes según la extracción en el grano, el fertilizante adquirió mayor importancia (65,5%). Al igual que la colza, los valores de extracción de nitrógeno fueron muy elevados y se requiere un importante gasto de energía para reponerlo.

Discusión

La obtención de energía de la biomasa vegetal mediante los llamados agrocombustibles,

especialmente el biodiesel, es considerada una de las alternativas más importantes al uso de los combustibles fósiles. Por esta razón, ha despertado un gran interés y su producción es promovida en varios países de Latinoamérica, entre ellos Argentina. Los resultados de este trabajo señalan, sin embargo, que la posibilidad de producir agrocombustibles a gran escala plantea una serie de impedimentos para un manejo sustentable, coincidiendo con otros estudios (WOLF *et al.*, 2003; GIAMPIETRO *et al.*, 1997; BHATTACHARYA *et al.*, 2003).

En primer lugar, la producción de biodiesel necesario para reemplazar solamente la demanda de gasoil (y no de energía) del agro, requeriría destinar, en forma exclusiva, una gran proporción

Tabla 5: Cálculo de las entradas de energía para el cultivo de colza bajo fertilización convencional y fertilización de reposición. Valores entre paréntesis señalan el porcentaje de energía total, gastada en cada rubro de insumos.

Insumos	Fertilización Convencional			Fertilización de Reposición		
	Cantidad u ha ⁻¹	Energía Total	E Entrada (MJ ha ⁻¹)	Cantidad u ha ⁻¹	Energía Total	E Entrada (MJ ha ⁻¹)
				Valor energético: 24,18 MJ Kg. ⁻¹ grano		
Maquinaria			327 (4,7%)			327 (3,7%)
Rastrar discos	2	89,6		2	89,6	
R discos DA	1	54,7		1	54,7	
Rolo	1	13,0		1	13,0	
Sembradora	1	51,7		1	51,7	
Pulverizadora	2	30,2		2	30,2	
Fertilizadora	1	3,7		1	3,7	
Cosechadora	1	83,9		1	83,9	
Combustible (L ha⁻¹)	43,65	1920,6	1921 (27,5%)	43,65	1920,6	1921 (21,9%)
Semilla (Kg. ha⁻¹)	6	145,1	145 (2%)	6	145,1	145 (1,7%)
Fertilizantes (Kg. ha⁻¹)			4342 (62,2%)			6143 (69,9%)
Nitrógeno	55	4159,7		70	5899,1	
Fósforo	12	168,0		9	128,0	
Potasio	0	0		0	0	
Azufre	11,75	13,2		12,6	106,7	
Calcio	14,7	1,5		10,4	11,6	
Plaguicidas (L ha⁻¹)			249 (3,6%)			249 (2,8%)
Trifluralina	1,25	208,8		1,25	208,8	
Dicamba	0,12	40,3		0,12	40,3	
			6984 (100%)			8785 (100%)

¿Es sustentable la producción de

Tabla 6: Cálculo de las entradas de energía para el cultivo de girasol bajo fertilización convencional y fertilización de reposición. Valores entre paréntesis señalan el porcentaje de energía total, gastada en cada rubro de insumos.

Girasol		Valor energético: 23,04 MJ Kg.-1 grano				
Insumos	Fertilización Convencional			Fertilización de Reposición		
	Cantida d u ha-1	Energía Total	E Entrada (MJ ha-1)	Cantida d u ha-1	Energía Total	E Entrada (MJ ha-1)
Maquinaria			334 (8,2%)			338 (7,3%)
Cinzel	1	28,7		1	28,7	
R discos DA	2	109,5		2	109,5	
Rastra dientes	1	13,0		1	13,0	
Escardillo	1	17,3		1	17,3	
sembradora	1	51,7		1	51,7	
Pulverizadora	2	30,2		2	30,2	
Fertilizadora	0	0		1	3,7	
Cosechadora	1	83,9		1	83,9	
Combustible (L ha-1)	51,55	2268,2	2268 (55,8%)	51,99	2287,6	2288 (49,4%)
Semilla (Kg. ha-1)	5	115,2	115 (2,8%)	5	115,2	115 (2,5%)
Fertilizantes (Kg. ha-1)			656 (16,2%)			1203 (26%)
Nitrógeno	7,2	544,5		12,8	968,1	
Fósforo	8	112,0		8,6	120,4	
Potasio				13	110,1	
Azufre				3,7	4,1	
Calcio				2,4	0,2	
Plaguicidas (L ha-1)			690 (17%)			690 (14,8%)
Acetoclor + Flurocloridona	2	370,0		2	370,0	
Cipermetrina	0,1	35,5		0,1	35,5	
Endosulfan	0,8	284,0		0,8	284,0	
Curasemilla	0,002	0,7		0,002	0,7	
			4064 (100%)			4634 (100%)

de la superficie de territorio, similar o superior a la que actualmente se cultiva. Para lograr estos niveles de producción existen 3 alternativas comunes a los países de América Latina: a) aumentar la superficie agrícola actual, avanzando sobre áreas naturales o destinadas a otros usos, b) elevar la productividad por unidad de área o c) reconvertir el destino actual de la producción hacia los agrocombustibles o cultivos energéticos. Cada una de estas alternativas presenta importantes inconvenientes a tener en cuenta.

Aumento de la superficie agrícola

Los resultados de este trabajo muestran que, en la Argentina, la totalidad de la producción actual de soja sólo podría suplir el gasto de gasoil del sector agropecuario (5.10⁹ L anuales de biodiesel, que representan menos de la mitad del consumo total). El cultivo de mejor rendimiento en biodiesel (girasol) demandaría una superficie de alrededor de 30 millones de hectáreas. Esto equivale a toda superficie implantada con cultivos anuales en Argentina (SAGPYA, 2008). Por lo tanto, deberían desplazarse casi todos los cultivos anuales, tanto otros oleaginosos, como no oleaginosos, para sembrar el girasol requerido

como materia prima. Esto implica, indefectiblemente, una expansión de la frontera agrícola hacia tierras generalmente menos productivas y con mayores limitantes, lo cual pone en duda que en el país existan condiciones ideales para la producción de biodiesel (UGOLINI, 2003), al menos a gran escala.

El avance sobre ecosistemas más frágiles tendría otras consecuencias ambientales negativas como la disminución de la biodiversidad, la degradación de los suelos y la disminución de su capacidad productiva, y la contaminación por mayor uso de insumos agrícolas (SARANDÓN, 2002). El avance de la frontera agropecuaria ha sido señalado como una

de las principales amenazas a la biodiversidad (UNEP, 1997), cuya mayor importancia radica en los servicios ecológicos que brinda (SWIFT *et al.*, 2004). La falta de estos servicios, debe suplirse con insumos, lo cual, además de causar perjuicios ecológicos graves, reduce la eficiencia energética de los sistemas productivos (ALTIERI, 1992; SARANDÓN, 2002). De esta manera, la producción de biodiesel sería responsable de la destrucción de la biodiversidad para hacer "monocultivos energéticos" que, paradójicamente, requieren la incorporación de elevadas cantidades de energía.

El aumento del rendimiento o productividad de los cultivos no puede considerarse una alternativa

Tabla 7: Cálculo de las entradas de energía para el cultivo de soja con fertilización convencional y fertilización de reposición. Valores entre paréntesis señalan el porcentaje de energía total, gastada en cada rubro de insumos.

Soja	Valor energético: 20,76 MJ Kg. ⁻¹ grano					
	Fertilización Convencional			Fertilización de Reposición		
	Cantida d u ha ⁻¹	Energi a Total	E Entrada (MJ ha ⁻¹)	Cantida d u ha ⁻¹	Energía Total	E Entrada (MJ ha ⁻¹)
Insumos						
Maquinaria			214 (2,6%)			217 (1%)
Sembradora SD	1	69,3		1	69,3	
Pulverizadora	4	60,4		4	60,4	
Fertilizadora	0	0		1	3,7	
Cosechadora	1	83,9		1	83,9	
Combustible (L ha⁻¹)	22,3	981,2	981 (11,9%)	22,7	1000,6	1001 (4,5%)
Semilla (Kg. ha⁻¹)	85	1949,1	1949 (23,7%)	85	1949,1	1949 (8,9%)
Fertilizantes (Kg. ha⁻¹)			656 (8%)			14404 (65,5%)
Nitrógeno	7,2	544,5		180	13613,4	
Fósforo	8	112,0		20,1	281,4	
Potasio				58,2	493,0	
Azufre				14,1	15,8	
Calcio				9	0,9	
Plaguicidas (L ha⁻¹)			4425 (53,8%)			4425 (20,1%)
Glifosato	7,5	3832,5		7,5	3832,5	
2,4 D	0,5	120,5		0,5	120,5	
Cipermetrina	0,12	42,6		0,12	42,6	
Endosulfan	1	355,0		1	355,0	
Carasemilla	0,21	74,6		0,21	74,6	
			8226 (100%)			21997 (100%)

¿Es sustentable la producción de

válida, ya que lo que se pretende es “cosechar energía”. El problema es que se requiere energía para transformar los ecosistemas en agroecosistemas. En este caso, el análisis de la eficiencia energética es esencial.

Aumento de la productividad: el problema de la eficiencia energética

La posibilidad de sustituir a los combustibles fósiles requiere pensar que la producción de agrocombustibles debe autosostenerse. Actualmente, depende mayormente de combustibles fósiles ya que la energía renovable usada en algunos sistemas agrícolas representa sólo un 7 al 16% de la energía total (GRÖNROOS *et al.*, 2006). En este sentido, desde un punto de vista energético, la producción de cultivos para biodiesel deberá lograr producir más energía que la que requiere su elaboración. Sin embargo, la agricultura moderna se ha caracterizado por lograr altos niveles de producción a costa de elevados insumos energéticos (DAZHON & PIMENTEL, 1990). La eficiencia energética de diferentes sistemas productivos ha demostrado tener valores bastante bajos, cercanos a la unidad o aún menores, dependiendo de la tecnología utilizada (OZKAN *et al.*, 2004; FLORES *et al.*, 2004).

Esto coincide con nuestros resultados, donde se observó un elevado uso de energía para la producción de los distintos cultivos, aunque con importantes diferencias. En todos los casos, se están reemplazando procesos ecológicos, como la regulación biótica o el ciclo de nutrientes, por la incorporación de energía en forma de insumos. Así, los plaguicidas y fertilizantes fueron responsables de gran parte de la energía invertida, y llegaron a representar, más del 80% en el cultivo de soja cuando se repusieron los nutrientes. La fertilización fue responsable de más del 60% de los gastos de energía de este cultivo. Se ha encontrado que en sistemas de producción de colza de altos insumos, hasta un 55% de la energía total invertida en el cultivo correspondió al

fertilizante nitrogenado (RATHKE & DIEPENBROCK, 2006). Aunque reponer estos nutrientes es inevitable para mantener la capacidad productiva de los suelos (FLORES & SARANDÓN, 2003), es posible aprovechar los procesos naturales de fijación biológica de nitrógeno para aumentar la eficiencia energética de estos sistemas.

El control de adversidades, a través de pesticidas, constituye otra parte importante del uso de la energía, dependiendo de los cultivos y el tipo de producción. En colza, se ha citado que hasta un 22% del total de energía invertida ha sido en pesticidas (RATHKE & DIEPENBROCK, 2006). En nuestro trabajo, los pesticidas no fueron muy importantes en colza, pero sí en los cultivos de soja y algodón, donde representaron más del 50% de la inversión energética. En soja, el ahorro de energía hecho con la siembra directa se tradujo en un elevado gasto en pesticidas (53,8%), ya que las malezas deben controlarse exclusivamente con herbicidas.

El gasto energético, para asegurar la regulación biótica del sistema, puede ser atribuido a la disminución de la biodiversidad en los agroecosistemas que simplifica la cadenas tróficas (por la eliminación de las fuentes de alimentación y refugio de los enemigos naturales) y promueve una alta concentración de recursos alimenticios para las plagas (SWIFT *et al.*, 2004). Por otra parte, la alta inversión de energía asociada al uso de herbicidas sugiere la necesidad de buscar alternativas de manejo de malezas energéticamente más eficientes. CLEMENS *et al.* (1995) encontraron en cultivos de maíz y soja, grandes diferencias (hasta 3 veces) en la energía invertida entre sistemas de manejo de malezas.

Para el caso aquí analizado, la energía “cosechada” en el biodiesel fue menor a la invertida para su obtención (soja y algodón), casi igual (colza) o, apenas superior (girasol), lo cual

señala la inviabilidad energética de los modelos intensivos de producción, o la dificultad de incrementar los rendimientos a través del uso intensivo de insumos. Además, los valores finales de eficiencia energética fueron calculados sin incluir los gastos de energía directa y asociada utilizada en los procesos industriales de obtención del biodiesel. Tampoco se tuvieron en cuenta los gastos de energía durante el transporte a lo largo de la cadena productiva y su distribución, que ha sido señalado como un aspecto fundamental a tener en cuenta en la posibilidad del uso masivo de bioenergía (HAMELINCK *et al.*, 2005).

Finalmente, debe considerarse que un proceso continuo de producción, requiere tener siempre una unidad de energía de reserva que lo impulse para obtener varias unidades de energía como producto final. Pero, además, se deberían reservar unidades adicionales para recomenzar el ciclo en el caso de que ocurran adversidades bióticas o climáticas de marcada incidencia sobre la producción (factor de seguridad). Por lo tanto, aún el cultivo con mejor resultado de eficiencia energética (girasol) se torna prácticamente inviable para la producción de biodiesel con la producción de materia prima según el modelo convencional intensivo.

Reconversión del destino de la producción

Finalmente, una tercera opción para producir agrocombustibles a gran escala es cambiar el destino actual de la producción agrícola, destinándola a la producción de biodiesel y bioetanol para abastecer a los mercados internos y a la exportación.

Esto determinará una creciente puja entre distintos destinos, pues la exportación de los agrocombustibles constituye un agronegocio promisorio para un mercado ávido de este combustible (ALTIERI & BRAVO, 2008). En este contexto, el papel de los países periféricos sería el de proveer energía barata a países ricos (CPT & RSJDH, 2007). Por ejemplo, en el año 2007, los

principales destinos para el biodiesel exportado por Argentina han sido los Estados Unidos (76%) y la UE (23,7%) (SAGPYA, 2008). Esta demanda de granos oleaginosos aumentaría su precio, tal como ya ocurrió con el maíz para etanol, que ha superado techos históricos en el 2006, con un aumento del 80% (MARTINEZ, 2008).

La mayor rentabilidad de los cultivos provoca una mayor demanda de tierras, desplazando a otras actividades (ganadería para carne y leche, trigo, entre otros) que tenderán a disminuir sus producciones con el consecuente aumento de precios y del costo de vida de las familias, ampliando aún más la brecha entre las clases sociales. El alza del precio de los granos también afecta el costo de la cría de animales, pues los mismos son utilizados para formular los alimentos balanceados (CPT & RSJDH, 2007). Asimismo, la demanda de tierras provocaría la concentración de las mismas en grandes grupos económicos y despoblamiento de las áreas rurales. En la mayoría de los países de América Latina, los trabajadores son explotados para hacer más rentable aún el negocio de los agrocombustibles.

El avance de la frontera agrícola y el énfasis de alcanzar altas productividades provocarían un mayor uso de insumos, deteriorando ecosistemas frágiles y disminuyendo, aún más, la eficiencia energética de la producción agrícola.

Conclusión

Bajo el modelo de agricultura de altos insumos prevaleciente en América latina, no es posible que los agrocombustibles sustituyan completamente a los combustibles fósiles sin generar graves consecuencias ecológicas y socioeconómicas. Por lo tanto, es preciso repensar la producción y uso de los agrocombustibles, así como el consumo el gasto energético asociado a nuestro estilo de vida y a la forma de hacer agricultura.

¿Es sustentable la producción de

Referencias bibliográficas

- AACREA (Asociación Argentina de Consorcios Regionales de Experimentación Agrícola). Visitada el 14 de marzo. 2006. Online. Disponible en Internet <http://www.aacrea.com.ar>
- ALTIERI, M.; BRAVO, E. La tragedia social y ecológica de la producción de agrocombustibles en el continente Americano. Citado el 24 de febrero. 2008. Online. Disponible en Internet <http://social.org.br>
- ALTIERI, M. El rol ecológico de la biodiversidad en agroecosistemas. **Agroecología y Desarrollo**, n.4, p.2-11,1992.
- ANDRADE, F.; SADRAS, V. **Bases para el manejo del maíz, girasol y la soja**. Buenos Aires: Editorial Médica Panamericana SA, 2000. 443 p.
- BHATTACHARYA, S.C. *et al.* Sustainable biomass production for energy in selected Asian countries. **Biomass and Bioenergy**, n. 25. p.471-482, 2003.
- BORIN, M. Effects of tillage systems on energy and carbon balance in north-eastern Italy. **Soil & Tillage Research** n.40, p.209-226, 1997.
- CLEMENTS, D.R. *et al.* Energy analysis of tillage and herbicide inputs in alternative weed management systems. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, n. 52, p.119-128, 1995.
- CORRADINI, E. Seminario de Biodiesel "El futuro del pasado", Santa Fe 2001, auspiciado por Monsanto y la SAGPYA. Visitada el 16 de octubre. 2003. Online Disponible en <http://www.sagpya.mecon.gov.ar>
- CPT (Comisión Pastoral de la Tierra); RSJDH (Red Social de Justicia y Derechos Humanos). Agroenergía: mitos e impactos en América Latina. Visitada el 14 de diciembre. 2007. Online. Disponible en Internet <http://social.org.br>
- DAZHONG, W.; PIMENTEL, D. Energy flow in agroecosystems of Northeast China. En: GLIESSMAN, S. (Ed.) **Agroecology: Researching the ecological basis for sustainable agriculture**: Springer-Verlag, p.322-336, 1990.
- FLORES, C.; SARANDÓN, S.J. ¿Racionalidad económica versus sustentabilidad ecológica? El análisis económico convencional y el costo oculto de la pérdida de fertilidad del suelo durante el proceso de agriculturización en la Región Pampeana Argentina. **Revista de la Facultad de Agronomía**, La Plata: 105 (1): 52-67, 2003.
- FLORES, C.C. *et al.* Eficiencia energética en sistemas hortícolas familiares del partido de La Plata, Buenos Aires, Argentina. Porto Alegre: **II Congreso Brasileiro de Agroecología, V Seminário Internacional sobre Agroecología, VI Seminário Estadual sobre Agroecología**, 2004. 1CD.
- GLIESSMAN, S. Agroecología. **Processos ecológicos em agricultura sustentável**. Segunda Edição. Rio Grande do Sul: Editora da Universidade, 2001. Cap.18, p.509-538.
- GRÖNROSS, J. Energy use in conventional and organic milk and rye bread production in Finland. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, n.117, p. 109-118, 2006.
- HAMELINCK, C. *et al.* Internacional bioenergy transport costs and energy balance. **Biomass and Bioenergy**, n29, p114-134, 2005.
- HERNANZ, J.L. *et al.* Long term energy use and economic evaluation of three tillage systems for cereal and legume production in central Spain. **Soil & Tillage Research** n.35, p.183-198, 1995.
- INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria de la República Argentina). Visitada el 14 de marzo. 2006. Online. Disponible en Internet <http://www.inta.gov.ar>
- LENOIR, C. Análisis de la producción de Biodiesel. Visitada el 4 de noviembre. 2003. Online. Disponible en Internet <http://www.ingenieroambiental.com/Biodiesel/Biodies el.htm>
- MARTÍNEZ, E. Energía + Medio ambiente + Alimentos: un humilde llamado de atención. Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Ministerio de Economía y Producción. Visitado el 7 de marzo de 2008. Disponible en <http://www.inti.gov.ar/temas.htm>
- OZKAN, B. *et al.* An input-output energy analysis in greenhouse vegetable production: a case study for Antalya region of Turkey. **Biomass Bioenergy** n.26, p.89-95, 2004.
- PIMENTEL, D. *et al.* Energy efficiencies of farming wheat, corn, and potatoes organically. In: **Organic Farming Current Technology, its Role in Sustainable Agriculture**, ASA, USA, special publication n.46, p.151- 161, 1991.
- RATHKE, G.; DIEPENBROCK, W. Energy balance of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) cropping as related to nitrogen supply and preceding crop. **European Journal of Agronomy**, n.24, p.35-44, 2006.
- SAGPYA (Secretaría de Agricultura,

- Argentina). Visitada el 8 de Abril. 2008a. Online. Disponible en Internet <http://www.sagpya.mecon.gov.ar>
- SAGPYA. Estimaciones agrícolas mensuales cifras oficiales al 19/03/08. Disponible en Internet <http://www.sagpya.mecon.gov.ar>. 2008b.
- SARANDON, S. (Ed.). **Agroecología. El camino hacia una agricultura sustentable**. La Plata: Ediciones Científicas Americanas, 2002. 557p.
- SMITH, G. Metabolismo energético y metabolismo de los ácidos grasos volátiles. En: CHURCH, D. (Ed.). **Fisiología digestiva y nutrición de los rumiantes**. Zaragoza: Editorial Acribia, 1974. v.2. Cap.23, p.242-247.
- SWIFT, M.J. *et al.* Biodiversity and ecosystem services in agricultural landscapes-are we asking the right questions?. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, n.104, p.113-134, 2004.
- TORRES CAMPOS, A. *et al.* Balanço energético na produção de feno de alfalfa em sistema intensivo de produção de leite. **Ciência Rural**, Santa María, v.34, n. 1, p.245-251, 2004.
- UGOLINI, J. Biodiesel, Estudio para determinar la factibilidad técnica y económica del desarrollo del biodiesel. Visitada el 4 de noviembre. 2003. Online. Disponible en Internet <http://www.ciara.com.ar/biodiesel.pdf>
- UNEP/CDB/COP/3. **The Biodiversity Agenda. Decisions from the third Meeting of the Conference of the Parties to the Convention on Biological Diversity**. Second Edition, Buenos Aires, 1997. 116 p.
- WOLF, J. *et al.* Exploratory study on the land area required for global food supply and the potential global production of bioenergy. **Agricultural Systems** n.76, p.841-861, 2003.
- ZENTER, R. *et al.* Effects of tillage method and crop rotation on non-renewable energy use efficiency for a thin Black Chernozem in the Canadian Prairies. **Soil & Tillage Research** n.77, p.125-136, 2004.