

Evaluación exergética de la producción de etanol en base a grano de maíz: un estudio de caso en la Región Pampeana (Argentina)

DIEGO O FERRARO ✉

IFEVA, Cátedra de Cerealicultura, Fac. de Agronomía, Univ. de Buenos Aires - CONICET, Bs. As., Argentina.

RESUMEN. La transformación de los sistemas naturales en sistemas productivos altera no sólo su estructura sino también su funcionalidad. La necesidad de evaluar y monitorear esos cambios funcionales ha llevado al desarrollo y la aplicación de un gran número de indicadores del impacto de las actividades humanas sobre los ecosistemas. En este trabajo se presenta un marco teórico para el estudio del deterioro de los ecosistemas agrícolas a través del análisis de los flujos de energía. Se presentan los fundamentos de la evaluación del funcionamiento de los agroecosistemas a través del uso de la energía útil o exergía, y se ilustra la metodología de cálculo en un sistema agrícola de la Región Pampeana destinado a la producción de etanol sobre la base de grano de maíz. Los resultados indican que si bien el impacto potencial en términos de extracción de recursos (bajo la forma de exergía consumida) es mayor en la fase industrial, las ineficiencias en la fase agrícola son mucho más marcadas. En cuanto al ciclado interno de exergía, los resultados de este trabajo indican que 41% de la exergía utilizada para obtener 1 MJ de exergía proviene de fuentes no renovables, y se eleva a 71% si se toma en cuenta el aporte neto de exergía del combustible, después de descontarle los costos exergéticos acumulados durante los procesos de elaboración. Estos resultados indican que el sistema analizado de producción de etanol sobre la base de maíz cumple de manera parcial las condiciones deseables de baja extracción de recursos del ambiente y alta renovabilidad de la producción.

[Palabras clave: sustentabilidad, agricultura, deterioro, exergía]

ABSTRACT. **Exergy efficiency assessment of corn-based ethanol production: a case study in the Pampas region (Argentina):** Natural ecosystems transformation in agroecosystems not only alters its structure but also its functionality. The need to evaluate and monitor these functional changes has led to the development and implementation of a large number of indicators of human impact due to agricultural activities. This paper develops a theoretical framework for the assessment of agroecosystems through the analysis of energy flows. In particular, the approach is based on the use of energy or useful exergy. Also, the calculation methodology is applied to a corn-based ethanol farming system located in the Pampa Region. Results indicate that although the potential impact in terms of resource extraction from the environment, in the form of exergy consumed, is highest in the industrial stage, the inefficiencies in the agricultural phase are much more pronounced. As for the internal cycling of exergy, the results of this study indicate that 41% of the exergy used to get 1 MJ of exergy comes from non-renewable sources, rising to 71% when you take into account the contribution of net exergy fuel. These results indicate that the crop-based system analyzed for ethanol production partially meets the desirable conditions of low resource extraction from the environment and high renewability of production.

[Keywords: sustainability, agriculture, energy]

✉ IFEVA, Cátedra de Cerealicultura, Fac. de Agronomía, Univ. de Bs. As. - CONICET. Av. San Martín 4453, (1417DSE). Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina. Tel.: 54-11-4524-8053 (ext. 44). Fax: 54-11-4524-8053 (ext.33). ferraro@agro.uba.ar

Recibido: 28 de abril de 2008; Fin de arbitraje: 5 de agosto de 2008; Revisión recibida: 27 de septiembre de 2008; Aceptado: 13 de octubre de 2008

INTRODUCCIÓN

La transformación de los ecosistemas naturales en sistemas productivos, como los forestales, los agrícolas o los ganaderos, no sólo altera la estructura sino también el funcionamiento de los ecosistemas, es decir, la transferencia de materia y energía entre la biota y el medio físico (Tilman et al., 2002). Muchos de estos procesos de transferencia pueden considerarse como servicios que los humanos usufructuamos en los agroecosistemas (Daily, 2000). Algunos ejemplos de estos procesos son la mineralización de la materia orgánica, la polinización o la producción de alimentos y fibras (Daily, 2000; Doran, 2002). La percepción de que parte de estas funciones pueden verse amenazadas determinó que en los últimos años se acuñara el término sustentabilidad de un agroecosistema (WCED, 1987; Chapin et al., 1996; Pope et al., 2004). Esta idea se refiere a la imposibilidad de mantener en el tiempo y dentro de sus límites naturales a los servicios del ecosistema (Cornelissen et al., 2001).

La pregunta que surge frente al deterioro potencial de la estructura y de las funciones de un ecosistema agrícola es cómo es posible evaluar numéricamente el funcionamiento actual a través de indicadores que permitan clasificar diferentes sistemas de producción (Buchs, 2003). Una alternativa es tasar el flujo de capital, para calcular el balance económico y la habilidad de ese sistema de generar una renta apropiable. En este caso, se puede analizar el sistema agrícola a partir de indicadores de rentabilidad (e.g., beneficio neto) y estimar así su viabilidad económica (Tisdell, 1996). Otra manera de analizar la funcionalidad de un sistema agrícola es estimar el flujo de materia entre sus distintos compartimentos y hacia afuera de sus límites. De esta manera, es posible cuantificar un balance de masa a partir de la medición de los cambios en los flujos y las variables de estado del sistema (Dalsgaard and Oficial, 1997). El objetivo principal de este enfoque es identificar las entradas y salidas más importantes del sistema para detectar riesgos asociados a la acumulación (i.e., contaminación) o a la pérdida (i.e., agotamiento

total o parcial) de algún elemento. La funcionalidad de un sistema agrícola a partir de la cuantificación de los flujos y las existencias puede describirse como un balance (i.e., variable de estado) cuando se hace hincapié en la conservación de un elemento, o se lo puede describir como un flujo cuando es necesaria una cantidad suficiente de recursos para garantizar el buen funcionamiento del ecosistema (Van Cauwenbergh et al., 2007). En ambos casos, el criterio de viabilidad se basa en el principio de la conservación de la masa dentro de los límites del sistema estudiado (Jorgensen and Fath, 2004).

Otra aproximación alternativa al estudio de la funcionalidad de un sistema agrícola está basada sobre el estudio del flujo de energía (Pimentel and Heichel, 1991; Pervanchon et al., 2002). El estudio del funcionamiento los sistemas manejados en términos de análisis energéticos no es nuevo en la literatura (Margalef, 1968; Coleman et al., 1976; Odum, 1984; Pimentel, 1984). Para entender como se puede relacionar el flujo de la energía y la posibilidad de diseñar un sistema sostenible es necesario plantear las alteraciones que implica la instalación de un sistema agrícola sobre ese flujo de energía (Figura 1). Los sistemas agrícolas son sistemas abiertos y disipativos, es decir que consumen energía para crecer, mantenerse y establecer un flujo de materia y energía con su entorno (Odum, 1984), lo cual determina una serie de propiedades sistémicas como son la existencia de distintos niveles jerárquicos, los retrocontroles, la estabilidad, o la resiliencia (Ulanowicz, 1999). En el caso de un sistema natural, el ingreso de energía está enteramente basado sobre la energía solar. Los componentes del sistema encargados de fijar está energía son los productores primarios. Este ingreso de energía circula a través de una serie de transformaciones jerárquicas que incluyen a los demás componentes de la red trófica, desde los consumidores hasta los descomponedores. De esta manera, es posible cerrar el ciclo de circulación de energía (producción-consumo-reciclado-nueva producción) y disponer fuera de la zona donde se desarrollan los ciclos de vida de los organismos a la materia que ya no pueda ser reutilizada y que actúe impidiendo el normal funcionamiento de los ciclos vivos

(Figura 1). De esta manera, y durante millones de años, los sistemas naturales han sido responsables de los procesos de formación de suelo y deposición de material fósil que es el origen de la energía que usa la sociedad actual (Wall, 2002). Este funcionamiento sobre la base del uso de energía solar, reciclaje y disposición de los desperdicios (fósiles y minerales) resulta alterado de manera abrupta cuando estudiamos los ecosistemas manejados (incluyendo los agroecosistemas). En los ecosistemas manejados, la función de producción ya no depende exclusivamente de la energía solar, sino que está basada sobre un flujo lineal, en un solo sentido, desde los recursos fósiles de la litosfera hacia el consumo y la generación de desechos. A diferencia de los sistemas naturales, la tasa de aumento de la materia no reciclable (i.e., desperdicios en los sistemas manejados) se amplifica tanto por la reducción relativa de los descomponedores como por el exceso de tamaño de los consumidores (Figura 1).

De la misma manera en que una evaluación económica de un sistema agrícola convierte todos los bienes y servicios en unidades monetarias, una evaluación energética convierte

a los bienes y servicios en unidades energéticas. De forma análoga a lo que sucede con la aproximación desde un balance de masa, el flujo de energía también está regulado por el principio de conservación y las leyes de la termodinámica. Esto significa que la energía se conserva a través de todos los procesos de transformación (Gong and Wall, 2001; Dewulf and Van Langenhove, 2005). Sin embargo, a diferencia de la materia, que puede ser descrita en ciclos globales (e.g., el ciclo del agua, el ciclo del carbono), la energía fluye en un solo sentido a través de diversas transformaciones que reducen su capacidad de efectuar trabajo. Lo que se consume en cada conversión es su *calidad* (Dewulf and Van Langenhove, 2005). La calidad de esta energía guarda relación con su capacidad de realizar trabajo, y se denomina *exergía* (Szargut et al., 1988; Dewulf and Van Langenhove, 2005). En términos prácticos, se puede decir que la exergía es una medida de la utilidad o del valor de una forma de energía. Técnicamente, la exergía se define como la máxima cantidad de trabajo que puede producir un sistema o un flujo de materia o energía al momento de alcanzar un equilibrio con un ambiente de referencia (i.e., a temperatura y

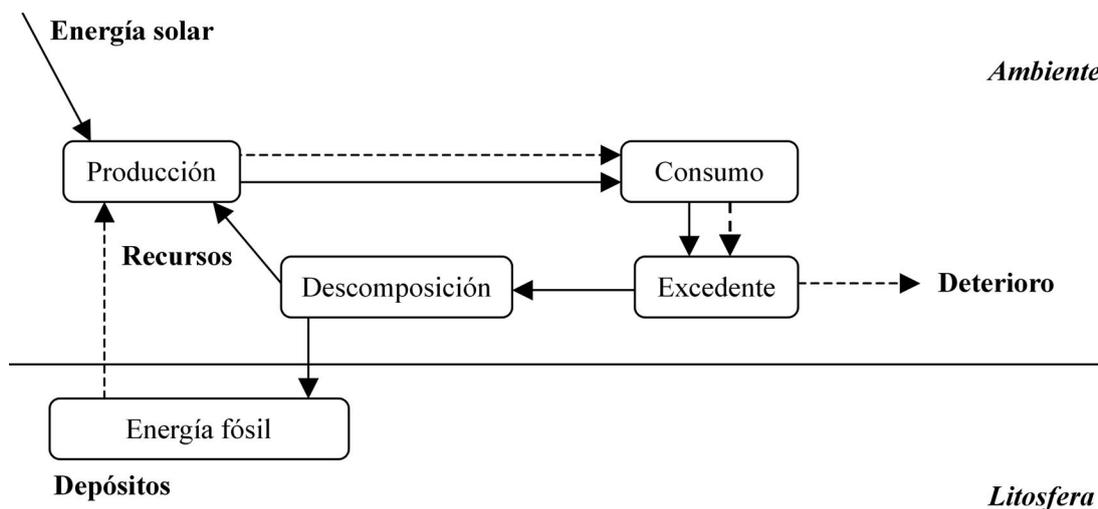


Figura 1. Flujos de energía en un sistema natural (líneas llenas) y en un sistema agrícola (líneas punteadas). Los cuadrados representan las transformaciones energéticas de los recursos usados en cada uno de los sistemas (adaptado de Wall 2002).

Figure 1. Energy flows in a natural system (full lines) and in an agricultural system (dotted lines). The squares represent the transformations of energy resources used in each system (adapted from Wall, 2002).

presión definidas) (Szargut et al., 1988). Entonces, el contenido exergético es una medida del potencial del sistema o del flujo estudiado para causar daño como consecuencia de no estar completamente en equilibrio con el ambiente (Rosen et al., 2008).

Todos los materiales poseen un contenido exergético determinable y calculable con respecto a una condición ambiental de referencia. Los valores elevados de exergía reflejan aumentos en la complejidad del sistema o del componente en estudio, con respecto a un sistema con la misma composición, a la misma temperatura y presión, pero en la forma de sus componentes más simples, sin ninguna organización, estructura biológica o moléculas orgánicas (Jorgensen and Fath, 2004) (e.g., una pieza de metal fundido tiene un valor de exergía mayor que la materia prima que le da origen, aunque su contenido energético es el mismo). La diferencia en el contenido exergético y energético puede variar en función del proceso estudiado. Por ejemplo, para la energía mecánica o para la energía eléctrica, el valor de energía es igual al de exergía (Rosen et al., 2008). Por el contrario, un proceso acompañado de una producción de calor significativa (i.e., el aumento de la entropía) tendrá diferencias significativas entre el contenido energético y exergético. El vapor, como fuente de energía, aún a presiones y temperaturas altas, tiene una baja relación exergía/energía, debido a que su procesamiento en una turbina libera una cantidad grande de energía como calor inútil en el momento en que su temperatura tiende a alcanzar la de los alrededores (Rosen et al., 2008). En un sistema ecológico, el cociente exergía/energía aumenta durante la sucesión hacia su madurez, en las primeras etapas, principalmente debido a la acumulación de masa, y en las etapas posteriores a las ganancias en materia de información y organización. Por el contrario, durante la senescencia esta relación disminuye junto a la posibilidad de almacenar la exergía, lo cual refleja la tendencia de los ecosistemas a regresar hacia el equilibrio con el ambiente (Jørgensen et al., 2000).

La identificación de las transformaciones energéticas en un sistema (i.e., termodinámi-

ca) en términos de exergía (energía útil) ofrece la posibilidad de su uso como indicador de funcionamiento. La hipótesis fundamental que vincula la termodinámica con el funcionamiento de los sistemas biológicos plantea que si un sistema recibe un ingreso de exergía externa será capaz de usar esa energía para efectuar un trabajo (Jorgensen and Fath, 2004). Este trabajo se usa, por un lado, para mantener la estructura del sistema, mientras que el remanente es capaz de efectuar trabajo útil que puede reflejarse en aumentos de la complejidad del sistema (e.g., información o biomasa) (Jorgensen and Fath, 2004). En los sistemas agrícolas, la exergía que se consume en los agroecosistemas se relaciona con la posibilidad de ofrecer trabajo útil en dos formas: el rendimiento cosechable y los servicios ecosistémicos (Pimentel et al., 1997; Costanza et al., 2007). La condición deseable de un sistema sería la maximización de la entrada de exergía y su canalización, en mayor medida, a la producción de estas dos formas. Sin embargo, en un sistema agrícola en condiciones reales, esta condición deseable depende del ajuste entre la oferta de recursos y la ingeniería del sistema (e.g., el manejo). Como se dijo anteriormente, el escaso desarrollo del componente de reciclado en los sistemas modernos resulta en un flujo libre de exergía hacia el ambiente. Como este flujo tiene el potencial para generar cambios en el ambiente, al no ser canalizado a través de ningún componente del sistema puede llevar a que tengan lugar reacciones químicas o procesos físicos sin control, que por lo general percibimos como deterioro ambiental (e.g., el calentamiento global, la destrucción de la capa de ozono, la erosión del suelo) (Wall, 2002).

Los sistemas agrícolas argentinos han sido poco evaluados mediante el uso del marco propuesto de análisis del uso de la exergía y su renovabilidad. Algunos ejemplos incluyen el análisis de los sistemas ganaderos de la Región Pampeana (Rotolo et al., 2007) o, en una escala mayor, el análisis exergético de los cambios en la agricultura pampeana en el siglo 20 (Ferreira, 2006). El objetivo particular de este trabajo es presentar los fundamentos teóricos de la evaluación exergética de un sistema productivo, e ilustrar la metodología de cálculo en un sistema agrícola ubicado en la

Región Pampeana destinado a la producción de etanol basada sobre grano de maíz.

MÉTODOS

Para ilustrar la cuantificación exergética de un proceso, se analizó la producción de etanol sobre la base de grano de maíz. La cadena productiva se separó en dos fases definidas: la agrícola y la industrial (Figura 2). La fase agrícola abarca la producción del grano de maíz y considera el uso de las semillas, los pesticidas, los fertilizantes, el combustible utilizado en la

etapa productiva y en el transporte del grano a la planta de molienda y, por último, el valor de exergía contenido en la maquinaria usada para esta etapa. En particular, la fase agrícola que se estudió corresponde a un cultivo de maíz creciendo en las condiciones climáticas y edáficas de la localidad de Pergamino (Prov. de Buenos Aires, Argentina). El uso de insumos corresponde a un sistema de producción modal de la zona, diseñado para obtener, bajo condiciones climáticas favorables, un rendimiento de 9000 kg/ha de grano de maíz. La fase industrial toma en cuenta los insumos necesarios para llevar a cabo, en primer lugar, los

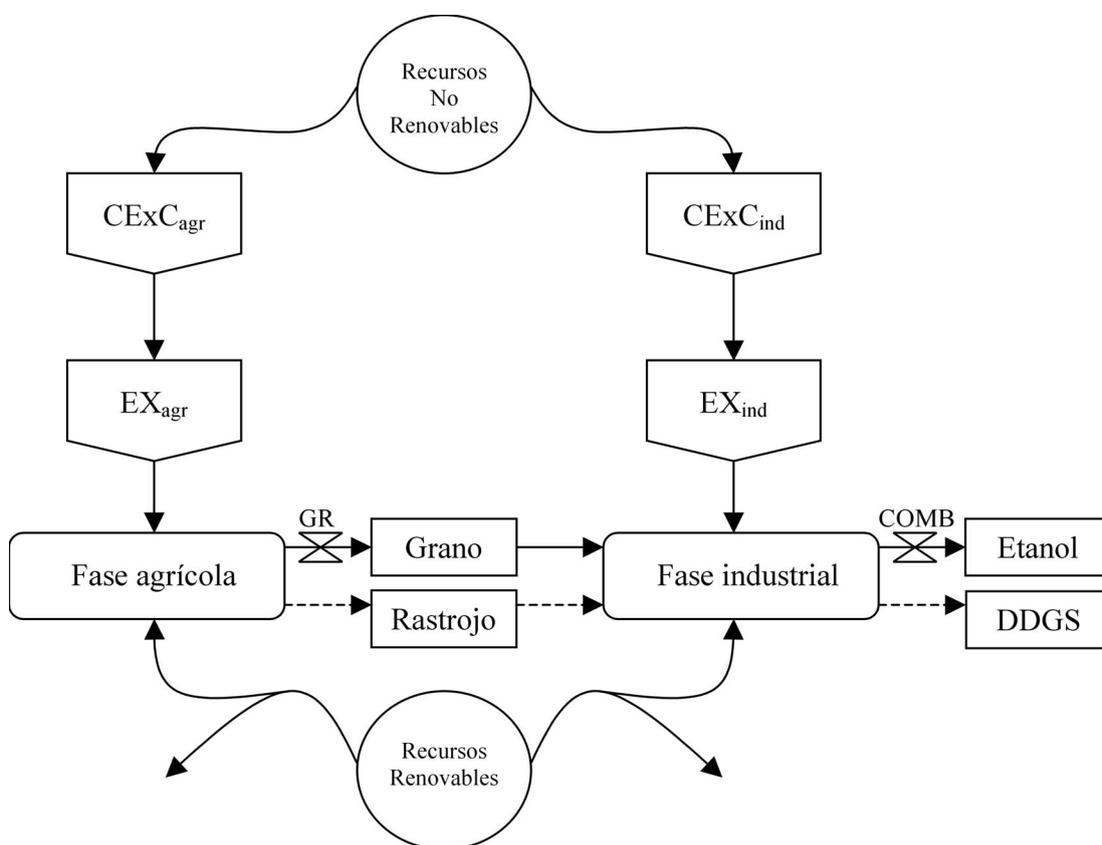


Figura 2. Descripción del sistema de producción de etanol en base a maíz. Las líneas representan los flujos de exergía en el sistema. $CExC_{agr}$ y $CExC_{ind}$: Consumo de Exergía Acumulada de la fase agrícola e industrial, respectivamente; EX_{agr} y EX_{ind} : Exergía de los insumos utilizados en la fase agrícola e industrial, respectivamente; GR y COMB: proporción de exergía entregada por el grano y el etanol luego de completada la fase agrícola e industrial, respectivamente.

Figure 2. Description of the corn-based ethanol production system. Dotted lines represent the exergy flow. $CExC_{agr}$ and $CExC_{ind}$: cumulative exergy consumption of the agricultural and industrial phases, respectively; EX_{agr} and EX_{ind} : Exergy consumption of the agricultural and industrial phases, respectively; GR and COMB: outcome exergy allocated to corn and biofuel, respectively.

procesos de molienda e hidrólisis, mediante el uso de la tecnología de molienda seca, con una eficiencia industrial de 0.3908 L de EtOH/kg de grano (Ulgati 2001; Hill et al. 2006). Luego tiene lugar la fermentación biológica de la materia prima, y se termina finalmente en la separación de la fases sólida y líquida y en la destilación del etanol (Patzek, 2004). Este proceso requiere energía en forma de gas, carbón y combustible líquido, y reactivos (i.e., enzimas y catalizadores químicos). El producto de la destilación es el etanol, que se usa como combustible líquido. Como resultado del proceso de fermentación es posible obtener un crédito energético derivado de los coproductos que se obtienen en el proceso industrial. En el caso de la obtención de etanol, esos coproductos se denominan granos de destilería de maíz desecados con solubles (DDGS, según su sigla en inglés) (Figura 2). Los DDGS se obtienen después de extraer el alcohol etílico a través de la fermentación de levaduras de un grano y se utilizan para suplementar la alimentación de rumiantes.

La cuantificación exergética de la cadena de producción se hizo a partir de dos variables: la exergía actual (EX) y el consumo de exergía acumulado (CExC) (Szargut, 2005; Zhu et al., 2005). La diferencia entre ambas variables es el límite del sistema, que determina hasta dónde se cuantifican los flujos de entrada de exergía. Mientras que la exergía actual mide el trabajo útil contenido en la estructura (i.e., el invertido en los proceso de construcción o síntesis de cada elemento) de los insumos directamente relacionados a las fases agrícola e industrial del proceso, el consumo de exergía acumulado amplía los límites de los procesos considerados, e incluye la extracción, el transporte y el almacenaje de la materia prima y la fabricación de los intermediarios (Szargut et al., 1988). La cuantificación de ambas variables se realiza a partir de la sumatoria de los distintos subcomponentes estructurales, ya sean químicos (composición) o físicos (trabajo aportado). El contenido exergético de cada uno de los insumos se obtuvo de diversas fuentes bibliográficas (Szargut et al., 1988; Szargut et al., 2002; Dewulf and Van Langenhove, 2005; Dewulf et al., 2005; Szargut, 2005). Cada cantidad de exergía es una expresión del valor del trabajo

que se obtiene en el proceso de cambio de estado de cualquier sustancia hacia un estado de referencia que, por convención, corresponde a una temperatura de 15 °C y 1 atm (Koroneos et al., 2003; Ertesvåg, 2007).

Para cuantificar tanto la exergía como el consumo acumulado, se realizó la sumatoria en cada una de las fases:

$$EX_{agr} = \sum_i^n Exagr_i \quad (1)$$

$$EX_{ind} = \sum_i^n Exind_i \quad (2)$$

$$CExC_{agr} = \sum_i^n CExC_{agr}_i \quad (3)$$

$$CExC_{ind} = \sum_i^n CExC_{ind}_i \quad (4)$$

donde n es el número de insumos en cada fase, y agr e ind corresponden a la fase agrícola e industrial, respectivamente. La relación entre EX y CExC se denomina grado acumulado de perfección (CDP). Su valor expresa la desviación con respecto a un estado termodinámico perfecto (i.e., sin pérdidas de trabajo útil) de una serie de procesos que van desde la extracción de la materia prima hasta la obtención del producto final (Szargut et al., 1988) y es una medida del retorno del trabajo entregado por un insumo con respecto a la exergía invertida en su obtención (i.e., eficiencia termodinámica):

$$CDP = EX / CExC \quad (5)$$

La evaluación del sistema de producción de etanol en este trabajo se basa sobre la partición del uso de exergía en forma directa (EX) o acumulada (CExC) hacia los distintos componentes del sistema, como son el grano, el rastrojo, el etanol y los destilados DGGs. Para ello, el consumo exergético fue particionado según la proporción que le corresponde a cada producto, tanto en la fase agrícola como en la fase industrial:

$$GR = \frac{EX_{grano}}{EX_{grano} + EX_{rastrojo}} \quad (6)$$

$$COMB = \frac{EX_{\text{etanol}}}{EX_{\text{etanol}} + EX_{\text{DDGS}}} \quad (7)$$

donde, GR y COMB equivalen a la proporción de exergía entregada por el grano y por el etanol luego de completada la fase agrícola e industrial, respectivamente. La Tabla 1 ilustra la forma de calcular la partición de exergía utilizada en cada una de las fases correspondiente al etanol, rastrojo y DDGS. Se calculó también el retorno exergético (R) que indica el grado de retorno por unidad de exergía invertida en insumos (R_{EX}) o durante toda la cadena de extracción, transporte y refinamiento (R_{global}):

$$R_{EX} = \frac{EX_{\text{Etanol}}}{\left[GR \times COMB \times EX_{\text{agr}} + COMB \times EX_{\text{ind}} \right]} \quad (8)$$

$$R_{\text{global}} = \frac{EX_{\text{Etanol}}}{\left[GR \times COMB \times CExC_{\text{agr}} + COMB \times CExC_{\text{ind}} \right]} \quad (9)$$

Por último, se calculó la fracción no renovable del proceso productivo como la inversa de R_{global} .

$$\text{Fracción No Renovable (\%)} = \frac{1}{R_{\text{global}}} \quad (10)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos muestran que cuando se considera el contenido de energía útil (i.e., exergía) de los insumos de la fase agrícola, el combustible demanda la mayor porción de exergía (Tabla 3). Sin embargo, cuando los límites del sistema van más allá del contenido de exergía del insumo, y se remontan hasta sus costos de producción, el fertilizante nitrogenado y los pesticidas resultan los mayores demandantes de exergía del sistema. El método de partición de la exergía utilizada entre los productos del sistema (i.e., etanol, rastrojo y DDGS) permitió particularizar los requerimientos exergéticos de la producción del biocombustible. Los resultados muestran que los requerimientos de la fase industrial del proceso de obtención de etanol son significativamente mayores que los que demanda la fase agrícola (Tabla 5). Sin embargo, el grado de perfección de ambos procesos (i.e., las pérdidas de trabajo útil en los procesos involucrados) es muy distinto. La evaluación de la fase agrícola determinó que aproximadamente un tercio ($CDP=0.36$) de la exergía proveniente de recursos no renovables extraídos del ambiente, es utilizada efectivamente para ejercer un trabajo útil en el proceso de obtención de etanol. En cuanto a la fase industrial, las pérdidas de exergía que no se canalizan hacia el proceso productivo son

Tabla 1. Cálculos de partición de la exergía utilizada en los distintos componentes del sistema de producción de etanol en base a maíz. Abreviaturas como en la Figura 1.

Table 1. Exergy allocation calculation of the corn-based ethanol production system. Abbreviations as in Figure 1.

Fuente	Inputs	Componentes			Total
		Etanol	Rastrojo	DDGS	
Exergía	NR _{agr}	GR x COMB x EX _{agr}	(1-GR) x EX _{agr}	GR x (1-COMB) EX _{agr}	EX _{agr}
	NR _{ind}	COMB x EX _{ind}	0	(1-COMB) x EX _{ind}	EX _{ind}
CExC	NR _{agr}	GR x COMB x CExC _{agr}	(1-GR) x CExC _{agr}	GR(1-COMB) x CExC _{agr}	CExC _{agr}
	NR _{ind}	COMB x CExC _{ind}	0	(1-COMB) x CExC _{ind}	CExC _{ind}

NR: Fuente no renovable
NR: non-renewable

Tabla 2. Exergía que se obtiene en cada uno de los componentes del sistema de producción de etanol (EtOH) estudiado.

Table 2. Exergy production of the corn-based ethanol (EtOH) production system.

Descripción	#	unidad	Producción (kg/ha)	Exergía por unidad (MJ/unidad)	Exergía total (GJ/ha)
Grano	1	kg	9000	17.6 ^d	158.4
Rastrojo ^a	2	kg	9000	7.52 ^e	67.7
Etanol ^b	3	l	3517	29.5	103.7
DDGS ^c	4	kg	3214	17.9	57.5

^aÍndice de Cosecha: 0.50. ^bEficiencia del proceso industrial: 0.3908 L de EtOH/kg de grano. ^cRendimiento de coproducto (DDGS): 0.914 kg de DDGS/L de EtOH. ^dContenido de humedad: 12%. ^eContenido de humedad: 40%.

^aHarvest Index: 0.50. ^bIndustrial efficiency: 0.3908 l EtOH / kg grain. ^cCo-product (DDGS) yield: 0.914 kg DDGS / l EtOH. ^dMoisture content: 12%. ^eMoisture content: 40%.

Tabla 3. Valores de exergía actual (EX) y exergía acumulada (CExC) usados en los insumos de la fase agrícola e industrial del proceso de obtención de etanol (EtOH) a partir de un cultivo de maíz. El detalle de los cálculos de cada insumo figura en la Tabla 4.

Table 3. Exergy (E) and cumulative exergy consumption (CExC) in the agricultural and industrial phase of the corn-based ethanol (EtOH) production system. Detailed calculations in Table 4.

Fase	Descripción	#	Exergía (EX)		Consumo Exergía Acumulado (CExC)	
			MJ/L EtOH	%	MJ/L EtOH	%
Agrícola ^a	Amortización	1	0.03	2.47	0.06	2.03
	Combustible	2	0.38	33.13	0.45	14.67
	Electricidad	3	0.23	20.58	0.67	21.74
	N	4	0.09	7.93	0.81	26.12
	P	5	0.04	3.63	0.11	3.47
	Pesticidas	6	0.14	12.32	0.71	23.14
	Transporte	7	0.23	19.93	0.27	8.83
Total			1.14		3.08	
Industrial	Carbón	8	8.31	54.71	8.75	51.93
	Gas	9	5.54	36.47	5.65	33.56
	Amortización	10	0.04	0.29	0.10	0.58
	Transporte	11	0.03	0.19	0.04	0.21
	Reactivos	12	0.60	3.96	1.65	9.77
	Procesamiento H ₂ O	13	0.38	2.48	0.38	2.24
	Control de efluentes	14	0.29	1.90	0.29	1.71
Total			15.19		16.85	

^aRendimiento: 9 t/ha. Zona: Pergamino. Fertilización: 100 kg de fosfato di amónico y 140 kg de urea. Pesticidas: Gifosato + Acetoclor + Cipermetrina + Atrazina. Labranza cero.

^aYield: 9000 kg/ha; Zone: Pergamino (Bs. As.); Fertilization: PDA (100 kg/ha), Urea (140 kg/ha); Pesticides: Glyphosate, Acetochlor, Atrazine, Cypermethrin; Zero tillage.

Tabla 4. Detalle de los cálculos de exergía utilizada. CDP es el grado acumulado de perfección de la fase y es una medida de la eficiencia termodinámica de los procesos (ver texto para más detalle).

Tabla 4. Exergy inventory.

Número de ítem	Descripción
1	Peso total de maquinaria usada: 3.4 t (sembradora) + 7.9 t (tractor) + 0.5 t (fertilizadora) + 0.5 t (pulverizador) + 15.5 t (cosechadora) + 9.5 t (tolva x3) = 35 t. Vida útil promedio de 10 años y 1000 ha/año trabajadas = 3.74 kg.ha ⁻¹ .año ⁻¹ . Exergía para producir y ensamblar la maquinaria agrícola: 26.5 MJ/kg (Patzek, 2004). CDP = 0.45 (Patzek, 2004).
2	Consumo de combustible: 8 L/ha (siembra) + 4 L/ha (fertilización) + 2 pulverizaciones terrestres x 0.95 L/ha (pulverización) + 4 L/ha (incorporación al suelo de herbicida Atrazina + 9.3 L/ha (cosechadora) + 8 L/ha (tractor + tolva) = 35.2 L.ha ⁻¹ .año ⁻¹ (Rathke et al., 2007; Anónimo, 2008). Exergía en 1 L de diesel = 37.74 MJ/L (Dewulf et al., 2005). CDP = 0.83 (Szargut et al., 1988).
3	Consumo de electricidad: 0.0917 MJ/kg cosechado (Farrell et al., 2006).
4	Aplicación de nitrógeno: 140 kg/ha urea (x 46%) + 100 kg fosfato monoamónico (x 22%), N = 86.4 kg/ha. Exergía en 1 kg de N = 3.68 MJ/kg (Patzek, 2004; Dewulf et al., 2005). CDP = 0.11.
5	Aplicación de fósforo: 100 kg fosfato monoamónico x 50%, P = 50 kg/ha. Exergía en 1 kg de N = 2.91 MJ (Patzek 2004). CDP = 0.39 (Dewulf et al., 2005).
6	Herbicidas: Glifosato, 2.5 kg/ha; Atrazina, 4 kg/ha; Acetoclor, 2 kg/ha. Insecticidas: Cipermetrina, 0.15 kg/ha. Contenido exergético (MJ/kg ingrediente activo) - CDP: Glifosato, 10.40 - 0.01; Atrazina, 215 - 0.73; Acetoclor, 30.40 - 0.06; 27.50 - 0.25 (Szargut et al., 1988; Green, 1997; Shapouri et al., 2002).
7	Transporte: flete a planta de procesamiento, 150 km; carga por viaje: 30 t; consumo de combustible: 0.4 L/km con carga máxima (Rathke et al., 2007). Exergía y CDP, ver en ítem 2.
8	Consumo: 8.31 MJ de exergía/L EtOH (Farrell et al., 2006). CDP = 0.95 (Farrell et al., 2006). Proceso de molienda seca: eficiencia de conversión, 0.3908 L de EtOH/kg de grano (Ulgati 2001).
9	Consumo: 5.54 MJ de exergía/L de EtOH (Farrell et al., 2006). CDP = 0.98 (Dewulf et al., 2005).
10	Planta de molienda seca: producción, 1.14 x 10 ⁸ L de EtOH/año; vida útil, 20 años. Exergía para producir y ensamblar la planta de molienda (cemento, acero y aluminio): 100.9 GJ (Hill et al., 2006).
11	Transporte: flete a punto de venta, 50 km; carga por viaje: 30 t; consumo de combustible: 0.4 L/km con carga máxima (Rathke et al., 2007). Exergía y CDP, ver en ítem 2.
12	Reactivos: levadura + amonio + CaO + NaCl + enzimas = 79.66 kg de reactivos/L EtOH (Ulgati 2001). Exergía promedio: 18.19 MJ/kg reactivos (Ulgati 2001). CDP promedio: 0.52 (Dewulf et al., 2005).
13	Consumo de exergía: 0.38 MJ de exergía/L de EtOH (Farrell et al., 2006). CDP: 1.0 (Dewulf et al., 2005).
14	Consumo de exergía: 0.29 MJ de exergía/L EtOH (Farrell et al., 2006). CDP: 1.0 (Dewulf et al., 2005).

menores (CDP=0.90), y su importancia relativa en términos de uso absoluto de exergía hace que el valor global de eficiencia termodinámica sea de 84% (CDP=0.84). De este análisis se desprende que si bien el impacto potencial

en términos de extracción de recursos del ambiente, expresado en exergía utilizada, es mayor en la fase industrial, las ineficiencias en la fase agrícola son mayores. Una de las formas en las que se puede mejorar el indicador de

Tabla 5. Exergía utilizada (MJ/L de EtOH) por los distintos componentes del sistema de producción de etanol en base a maíz. CDP es el grado acumulado de perfección de la fase y es una medida de la eficiencia termodinámica de los procesos (ver texto para más detalle).

Table 5. Exergy used (Mj / l EtOH) for the components of the of the corn-based ethanol production system. CDP is the degree of perfection of cumulative phase and is a measure of the thermodynamic efficiency of the processes (see text for details).

Fase	Inputs	Componentes			Total
		Biocombustible	Rastrojo	DDGS	
Agrícola	EX	0.51	0.34	0.28	1.14
	CexC	1.39	0.92	0.77	3.08
	CDP agrícola	0.36			
Industrial	EX	9.77	0.00	5.42	15.19
	CexC	10.84	0.00	6.01	16.85
	CDP industrial	0.90			
Total	CDP global	0.84			

eficiencia termodinámica de la fase agrícola (i.e., CDP) es la implementación de nuevas tecnologías de síntesis de fertilizantes y pesticidas que reduzcan la pérdida de energía útil en el camino de obtención del producto final. Sin embargo, un manejo agronómico ajustado puede también incrementar el retorno de la exergía invertida al impactar sobre el rendimiento del cultivo (i.e., la materia prima para producir biocombustibles). Algunos ejemplos pueden ser el ajuste en la elección del genotipo (y las variables que controlan su interacción con el ambiente como la fecha o la densidad de la siembra), o el control, sobre la base del conocimiento de la incidencia mediada por el ambiente y el manejo, de los factores determinantes del rendimiento alcanzable que abarcan adversidades bióticas como las malezas, las plagas y las enfermedades (van Ittersum and Rabbinge, 1997).

Las eficiencias mencionadas anteriormente se refieren a los procesos involucrados en cada una de las fases productivas. Sin embargo, la evaluación también puede extenderse a la cuantificación de la producción de energía neta durante el proceso. Los resultados de los presupuestos exergéticos, después de particionar la fracción correspondiente al etanol, muestran que el resultado exergético neto después de contabilizar todas las pérdidas de exergía, es 41% menor al obtenido si se contabilizara sólo la exergía específica

del combustible líquido (Tabla 6). Tal como se mencionara antes, esta caída no tiene un efecto restringido a la pérdida de eficiencia del proceso y la obtención de menos energía útil, sino que se asocia a la posibilidad de que se produzcan procesos y reacciones químicas no controladas que deriven en procesos de deterioro. Además, la reducción de la energía útil entregada llevaría a una mayor demanda de consumo de recursos naturales por unidad de combustible para poder suplir la demanda creciente de energía (Ulgiati 2001). La Tabla 7 ilustra cómo es el retorno de energía en el sistema, ya sea al considerar la exergía de los insumos (R_{EX}) o el consumo acumulado de exergía (R_{global}). En este último caso, los datos muestran que el sistema de producción de etanol analizado (y que representa un promedio de rendimiento para la zona) multiplica por un factor mayor a 2 la exergía que se aporta para la producción de grano y procesamiento industrial, respecto a la obtenida en el combustible. Sin embargo, este nivel relativamente bueno de retorno energético se reduce al tomar en cuenta el aporte neto de energía del sistema. Así, el retorno de exergía cae a una ganancia de 67 y 41% según se tome en cuenta el contenido de exergía de los insumos o la totalidad de la cadena productiva, respectivamente.

El análisis que se presenta en este trabajo también permitió estimar la dependencia de recursos no renovables del sistema de pro-

Tabla 6. Valores de exergía actual total (EX_{tot}), exergía acumulada total ($CExC_{tot}$), contenido exergético bruto (Exergía_{etanol}) y neto del etanol, derivados del análisis del proceso de obtención de biocombustible a partir de un cultivo de maíz (Valores en MJ/L de etanol). Entre paréntesis se indica la reducción de la exergía neta respecto a la exergía específica del etanol.

Table 6. Total exergy value (EX_{tot}), cumulative exergy consumption ($CExC_{tot}$), gross exergy content (Exergy ethanol) and net exergy content of ethanol, derived from the analysis of the corn-based ethanol production system (Values in MJ / l ethanol). The reduction of the net exergy regard to the specific exergy ethanol is indicated between brackets.

EX_{tot}	$CExC_{tot}$	Exergía _{etanol}	EX_{neta}
10.28	12.23	29.50	17.27 (-41.4%)

Tabla 7. Evaluación del proceso de obtención de biocombustible a partir de un cultivo de maíz, tomando en cuenta el contenido exergético bruto (29.50 MJ/L) o el neto (17.27 MJ/L) del etanol obtenido. El retorno exergético (R) indica la proporción de la exergía obtenida respecto a la invertida, tomando en cuenta la exergía total de los insumos (R_{EX}) o la exergía acumulada (R_{global}). La fracción no renovable es $= 1/R_{global}$.

Table 7. Assessment of the corn-based ethanol production system using the gross (29.50 Mj / l) or net exergy content (17.27 Mj / l) of ethanol produced. The exergy return (R) indicates the proportion of the exergy obtained in relation to total exergy inputs (R_{EX}) or the cumulative exergy consumption (R_{global}). The non-renewable fraction is $= 1 / R_{global}$.

Contenido exergético del etanol	R_{EX}	R_{global}	Fracción no renovable
Bruto	2.87	2.41	0.41
Neto	1.67	1.41	0.71

ducción de etanol en estudio. Uno de los fundamentos más fuertes para sostener el diseño de sistemas de producción de combustibles a partir de biomasa vegetal es su renovabilidad (Deluga et al., 2004). La idea de renovabilidad completa se basa en suponer que el proceso de producción de etanol se asemeja al ciclo natural, ya que el componente de producción de materia prima (i.e., cultivo) es capaz de captar la exergía no utilizable derivada del uso del combustible al final del ciclo (i.e., CO_2). Sin embargo, este ciclo ideal y potencialmente renovable sólo podría darse en el caso de que no existiera exergía no utilizable. A este sistema se lo podría describir como un cultivo de maíz que crece naturalmente a partir de agua, CO_2 atmosférico y radiación solar; la glucosa que se produce es transformada en etanol y, finalmente, el etanol es quemado para producir trabajo, calor y CO_2 , que es vuelto a captar por el sistema de producción de grano (Berthiaume et al., 2001). Sin embargo, en la realidad los ciclos productivos están lejos de presentar estas condiciones, y los resultados de este trabajo así lo indican al cuantificar el

hecho que 41% de la energía utilizada para obtener 1 MJ de energía proviene de fuentes no renovables. Este número se magnifica si se toma en cuenta el aporte neto de exergía, que eleva el porcentaje de energía de fuentes no renovables a 71%.

Tanto los datos de renovabilidad como los de eficiencia exergética o exergía utilizados en ambas fases están dentro del rango delimitado a través de otros estudios (Berthiaume et al., 2001; Shapouri et al., 2002; Patzek, 2004; Dewulf et al., 2005; Hill et al., 2006; Malça and Freire, 2006). Las variaciones de retorno energético o exergético por lo general son positivas, aunque dependen del grado de uso de los insumos y de la eficiencia del proceso industrial de obtención de etanol (Farrell et al., 2006). El sistema en estudio en este trabajo presenta una de las eficiencias más altas de obtención de etanol a partir de grano, y presupone un rendimiento en grano superior al promedio zonal [7025 kg/ha para el período 1997-2006 (SAGYPA, 2007)]. Por estas razones, es posible inferir que, en el caso de contemplar

variaciones a las condiciones analizadas, estas harían que se obtuviera un menor retorno de la exergía utilizada o de intensidad de uso de los recursos no renovables.

CONCLUSIONES

Este trabajo propone los fundamentos teóricos y operativos de un enfoque exergético para evaluar el funcionamiento de un agroecosistema de producción de biocombustible. El enfoque de evaluación basado sobre el flujo de exergía fue aplicado al caso de la producción de etanol proveniente de un cultivo de maíz bajo las condiciones que prevalecen en la principal área productiva de la Región Pampeana. Los resultados indicaron que la fase agrícola del proceso es la que menor exergía consume; pero a la vez es la que está más alejada de un estado termodinámico ideal donde no hay pérdidas de energía útil. Esta distancia, demuestra la necesidad de ajustar los procesos de la fase agrícola para maximizar, de manera más que proporcional, el rendimiento respecto al uso de insumos y así reducir la pérdida de exergía al ambiente. Esta exergía tiene la capacidad potencial de generar deterioro o cambios no controlados en el ambiente. Los resultados también reflejan la intensidad de uso de los recursos naturales, que puede alcanzar hasta 71% de la energía neta obtenida. Este parámetro es fundamental en el análisis de la viabilidad de una producción de combustibles vegetales, que basa mucha de sus ventajas sobre el reciclado de la materia y energía. Los resultados obtenidos están basados sobre un perfil productivo típico, por lo que estudios que abarquen bases de datos reales de producción podrían indicar la distribución real de los parámetros encontrados, además de comparar el desempeño de sistemas productivos de tecnologías contrastantes. A pesar de que las decisiones con respecto al diseño y la modificación de los sistemas agrícolas están normalmente asociadas no solo a la eficiencia del flujo de exergía sino también a la del flujo de capital, la seguridad alimentaria u otros temas, el estudio de caso presentado demuestra que los indicadores de funcionamiento basados en el estudio del flujo de la exergía pueden ser herramientas útiles para tomar decisiones

tecnológicas y ambientales tanto en sistemas agrícolas de producción de biocombustibles como en cualquier otro sistema productivo.

BIBLIOGRAFÍA

- ANÓNIMO. 2008. Márgenes brutos. *Márgenes Agropecuarios* 23:55.
- BERTHIAUME R; C BOUCHARD & MA ROSEN. 2001. Exergetic evaluation of the renewability of a biofuel. *Exergy, An International Journal* 1:256-268.
- BUCHS, W. 2003. Biodiversity and agri-environmental indicators--general scopes and skills with special reference to the habitat level. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 98:35-78.
- COLEMAN, DC; R ANDREWS; JE ELLIS & JS SINGH. 1976. Energy flow and partitioning in selected man-managed and natural ecosystems. *Agro-Ecosystems* 3:45-54.
- CORNELISSEN, AMG; J VAN DER BERG; WJ KOOPS; M GROSSMAN & HMJ UDO. 2001. Assessment of the contribution of sustainability indicators to sustainable development: a novel approach using fuzzy set theory. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 86:173-185.
- COSTANZA, R; B FISHER; K MULDER; S LIU & T CHRISTOPHER. 2007. Biodiversity and ecosystem services: A multi-scale empirical study of the relationship between species richness and net primary production. *Ecological Economics* 61:478.
- CHAPIN, FS; MS TORN & M TATENO. 1996. Principles of ecosystem sustainability. *American Naturalist* 148:1016-1037.
- DAILY, GC. 2000. Management objectives for the protection of ecosystem services. *Environmental Science & Policy* 3:333-339.
- DALSGAARD, JPT & RT OFICIAL. 1997. A quantitative approach for assessing the productive performance and ecological contributions of smallholder farms. *Agricultural Systems* 55:503-533.
- DELUGA, GA; JR SALGE; LD SCHMIDT & XE VERYKIOS. 2004. Renewable hydrogen from ethanol by autothermal reforming. *Science* 303:993-996.
- DEWULF, J & H VAN LANGENHOVE. 2005. Integrating industrial ecology principles into a set of environmental sustainability indicators for technology assessment. *Resources, Conservation and Recycling* 43:419-432.
- DEWULF, J; H VAN LANGENHOVE & B VAN DE VELDE. 2005. Exergy-Based Efficiency and Renewability Assessment of Biofuel Production. *Environ. Sci. Technol.* 39:3878-3882.

- DORAN, JW. 2002. Soil health and global sustainability: translating science into practice. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **88**:119-127.
- ERTESVÄG, IS. 2007. Sensitivity of chemical exergy for atmospheric gases and gaseous fuels to variations in ambient conditions. *Energy Conversion and Management* **48**:1983-1995.
- FARRELL, AE; RJ PLEVIN; BT TURNER; AD JONES; M O'HARE ET AL. 2006. Ethanol Can Contribute to Energy and Environmental Goals. *Science* **311**:506-508.
- FERREIRA, C. 2006. Energy analysis of one century of agricultural production in the Rolling Pampas of Argentina. *International Journal of Agricultural Resources, Governance and Ecology* **5**:185-205.
- GONG, M & G WALL. 2001. On exergy and sustainable development - Part 2: Indicators and methods. *Exergy, An International Journal* **1**:217-233.
- GREEN, MB. 1997. Energy in pesticide manufacture, distribution and use. Pp. 165-177, en: Helsel, ZR (ed.), *Energy in Plant Nutrition and Pest Control*. Elsevier, Amsterdam.
- HILL, J; E NELSON; D TILMAN; S POLASKY & D TIFFANY. 2006. From the Cover: Environmental, economic, and energetic costs and benefits of biodiesel and ethanol biofuels. *PNAS* **103**:11206-11210.
- JØRGENSEN, SE & BD FATH. 2004. Application of thermodynamic principles in ecology. *Ecological Complexity* **1**:267-280.
- JØRGENSEN, SE; BC PATTEN & M STRASKRABA. 2000. Ecosystems emerging: 4. growth. *Ecological Modelling* **126**:249-284.
- KORONEOS, C; T SPACHOS & N MOUSSIOPOULOS. 2003. Exergy analysis of renewable energy sources. *Renewable Energy* **28**:295-310.
- MALÇA, J & F FREIRE. 2006. Renewability and life-cycle energy efficiency of bioethanol and bio-ethyl tertiary butyl ether (bioETBE): Assessing the implications of allocation. *Energy* **31**:3362-3380.
- MARGALEF, R. 1968. *Perspectives in Ecological Theory*. University of Chicago Press, Chicago, IL.
- ODUM, EP. 1984. Properties of Agroecosystems. Pp. 5-11, en: Lowrance, R; BR Stinner & GJ House (eds.), *Agricultural Ecosystems. Unifying Concepts*. John Wiley and Sons.
- PATZEK, TW. 2004. Thermodynamics of the Corn-Ethanol Biofuel Cycle. *Critical Reviews in Plant Sciences* **23**:519-567.
- PERVANCHON, F; C BOCKSTALLER & P GIRARDIN. 2002. Assessment of energy use in arable farming systems by means of an agro-ecological indicator: the energy indicator. *Agricultural Systems* **72**:149-172.
- PIMENTEL, D. 1984. Energy Flow in Agroecosystems. Pp. 121-132, en: Lowrance, R; BR Stinner & GJ House (eds.), *Agricultural Ecosystems: Unifying Concepts*. John Wiley & Sons, New York.
- PIMENTEL, D & GH HEICHEL. 1991. Energy Efficiency and Sustainability of Farming Systems. Pp. 25-34, en: Lal, R & FJ Pierce (eds.), *Soil Management for Sustainability*. Ankeny, Iowa: Soil and Water Conservation Society.
- PIMENTEL, D; C WILSON; C McCULLUM; R HUANG; P DWEN ET AL. 1997. Economics and Environmental Benefits of Biodiversity. *Bioscience* **47**:747-757.
- POPE, J; D ANNANDALE & A MORRISON-SAUNDERS. 2004. Conceptualising sustainability assessment. *Environmental Impact Assessment Review* **24**:595-616.
- RATHKE, GW; BJ WIENHOLD; WW WILHELM & W DIEPENBROCK. 2007. Tillage and rotation effect on corn-soybean energy balances in eastern Nebraska. *Soil and Tillage Research* **97**:60-70.
- ROSEN, MA; I DINCER & M KANOGLU. 2008. Role of exergy in increasing efficiency and sustainability and reducing environmental impact. *Energy Policy* **36**:128-137.
- ROTOLO, GC; T RYDBERG; G LIEBLEIN & C FRANCIS. 2007. Energy evaluation of grazing cattle in Argentina's Pampas. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **119**:383-395.
- SAGPYA. 2007. *Estimaciones agrícolas. Anexo Estadístico*. Dirección de Coordinación de Delegaciones, SAGPYA, Ministerio de Economía. Argentina. <http://www.sagpya.mecon.gov.ar/new/0-0/agricultura/otros/estimaciones/base.php>.
- SHAPOURI, H; JA DUFFIELD & M WANG. 2002. *The energy balance of corn ethanol: an update*. USDA, Office of Energy Policy and New Uses, Agricultural Economics, Washington, p. 14.
- SZARGUT, J. 2005. *Exergy Method: Technical and Ecological Applications*. WIT Press, Southampton.
- SZARGUT, J; DR MORRIS & FR STEWARD. 1988. *Exergy analysis of thermal, chemical, and metallurgical processes*. Hemisphere Publishing Corporation, Berlin.
- SZARGUT, J; A ZIEBIK & W STANEK. 2002. Depletion of the non-renewable natural exergy resources as a measure of the ecological cost. *Energy Conversion and Management* **43**:1149-1163.
- TILMAN, D; KG CASSMAN; PA MATSON; R NAYLOR & S POLASKY. 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature* **418**:671-677.
- TISDELL, C. 1996. Economic indicators to assess the sustainability of conservation farming projects: An

- evaluation. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **57**:117-131.
- ULANOWICZ, RE. 1999. Life after Newton: an ecological metaphysic. *Biosystems* **50**:127.
- ULGIATI, S. 2001. A Comprehensive Energy and Economic Assessment of Biofuels: When "Green" Is Not Enough. *Critical Reviews in Plant Sciences* **20**:71-106.
- VAN CAUWENBERGH, N; K BIALA; C BIELDERS; V BROUCKAERT; L FRANCHOIS ET AL. 2007. SAFE - A hierarchical framework for assessing the sustainability of agricultural systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **120**:229-242.
- VAN ITTERSUM, MK & R RABBINGE. 1997. Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations. *Field Crops Research* **52**:197-208.
- WALL, G. 2002. Conditions and tools in the design of energy conversion and management systems of a sustainable society. *Energy Conversion and Management* **43**:1235.
- WCED. 1987. *Our common future*. Oxford University Press, Oxford.
- ZHU, P; X FENG & RJ SHEN. 2005. An Extension to the Cumulative Exergy Consumption Applied to Environmental Impact Analysis of Industrial Processes. *Process Safety and Environmental Protection* **83**:257-261.