



Universidad  
Zaragoza

# Proyecto Fin de Carrera

## Ingeniería Industrial

Balance exergético del sistema agrario español

Autor

Jesús Álvaro Miguel Martínez

Director

Alicia Valero Delgado

EINA  
2013







A mi familia, por apoyarme en todo durante el proyecto y la carrera.

A mis amigos, por alegrarme hasta los peores días.

A mi directora, por toda su ayuda.



# Balance exergético del sistema agrario español

## Resumen

Trabajos como Leach (1976) o Carpintero y Naredo (2006), arrojan una visión perturbadora del panorama agroalimentario actual. Desde la revolución industrial la productividad del sector agrario (agricultura y ganadería) no ha hecho más que aumentar, al mismo tiempo que se reducía el esfuerzo humano necesario para producir los alimentos. Sin embargo esto ha conducido a una situación donde el índice exergético (la energía útil proporcionada por el sistema respecto a la aportada) ha pasado de cerca de 25 a 0,34 (Leach, 1976). Actualmente necesitamos enormes cantidades de energía para producir nuestra alimentación, hasta el extremo de deber aportar al sistema agrario más calorías en forma de petróleo u otras fuentes de energía, que las que obtenemos de los alimentos. Por esta razón se ha realizado este trabajo, para estudiar el consumo energético del sistema agrario y varios de sus subsistemas y obtener sus eficiencias durante los años 2008-2009.

En primer lugar se han explicado los conceptos de exergía, metodología input-output y análisis termoeconómico, que serán de utilidad de cara a realizar los cálculos del trabajo. De forma muy breve, la exergía es la energía útil, y aúna los conceptos de energía y entropía. La metodología input-output y el análisis termoeconómico nos permiten calcular variaciones en los flujos exergéticos internos de un sistema cuando cambian las condiciones externas del mismo.

En segundo lugar se han estudiado los balances exergéticos de distintos subsistemas del sistema agrario. El trigo, la cebada, el arroz, el maíz, la producción de leche de vaca, de carne de ternera y de carne de pollo. Obteniéndose unos índices exergéticos que van desde el 2,02 para el caso del trigo hasta el 0.11 para la producción de carne de ternera.

Posteriormente se ha realizado el balance exergético del sistema agrario agregado, resultando un índice exergético de 0,71. Esto quiere decir que se necesita gastar, en media, 1 caloría en forma de petróleo u otra fuente de energía por cada 0,71 calorías destinadas a la alimentación humana.

Por último se ha realizado un análisis termoeconómico del sistema agrario, desagregando del total la importación de piensos, la producción de carne de pollo y la producción de carne de ternera. De esta forma se ha podido estudiar la reacción del sistema ante diversos escenarios propuestos, como medidas de ahorro energético o de variación de la dieta.

Se concluye que el sistema agrario actual es exergéticamente muy ineficiente, y que entre las causas de ello están, el gran consumo de carne, cuya producción es un sistema muy ineficiente por naturaleza, y el uso de grandes cantidades de agua y fertilizantes, cuya exergía asociada supone un gran input al sistema que, por tratarse de una exergía proporcionada de forma indirecta, puede pasar desapercibida.





# Tabla de contenidos

1. Introducción.....	1
2. Metodología.....	3
2.1. Ecología industrial y herramientas.....	3
2.1.1. El análisis exergético.....	3
2.1.2. Metodología input-output.....	4
2.1.3. Análisis termoeconómico.....	6
2.2. Balances exergéticos.....	7
3. Balances exergéticos específicos.....	9
3.1. Balance exergético del trigo.....	9
3.1.1. Balance exergético del trigo en secano.....	9
3.1.2. Balance exergético del trigo en regadío.....	11
3.2. Balance exergético de otros cultivos significativos.....	12
3.3. Balance exergético del ganado bovino y aviar.....	13
4. Balance exergético total.....	15
5. Análisis de sensibilidad.....	17
5.1. Cálculos previos.....	18
5.2. Escenario 1. Reducción del consumo de carne.....	18
5.3. Escenario 2. Sustitución del consumo de carne.....	19
5.4. Escenario 3. Eficiencia energética.....	19
5.5. Escenario 4. Modificación del sistema de regadío.....	20

5.6. Escenario 5. Revalorización de residuos ganaderos.....	20
5.7. Comparación de escenarios.....	20
6. Conclusiones.....	21
7. Perspectivas.....	23
8. Bibliografía.....	25
Appendix A: Exergy in industrial ecology.....	27
Appendix B: Input-output methodology.....	33
Appendix C: Thermoeconomic analysis.....	39
Appendix D: Exergy balances.....	47

# 1. Introducción

Para entender el porqué de este trabajo, es conveniente pararse antes a reflexionar un momento sobre el cambio radical en la forma de obtener sus alimentos que ha experimentado el ser humano desde la revolución industrial.

El sistema agrario tradicional se caracterizaba, entre otras cosas, por requerir un aporte de energía muy reducido, en forma de trabajo humano o animal, en comparación con la energía devuelta en forma de alimentos.

La revolución industrial fue provocando cambios en las condiciones del sistema agrario. Maquinas operadas con vapor que sustituían algunos de los procesos humanos, una mayor demanda, especialmente en cuanto a consumo de carne se refiere, la progresiva electrificación de las granjas, etc. Todo esto provocó un aumento de los requerimientos de energía del sistema agrario.

Pero la verdadera transición hacia la plena industrialización y el sistema agrario actual se produjo durante las tres décadas posteriores a la segunda guerra mundial, en lo que se ha dado en llamar “La Revolución Verde”. Esta iniciativa, desarrollada originalmente por el americano Norman Borlaugh, consiste en utilizar variantes modificadas de alto rendimiento de los cultivos, así como un uso intensivo de estructuras de regadío, fertilizantes químicos y pesticidas para aumentar la producción. Esto, aunado con la demanda cada vez mayor de productos cárnicos y la sustitución mayoritaria de la ganadería tradicional por la intensiva, con altos consumos de pienso, condujo al aumento desproporcionado de las necesidades energéticas del sector agrario.

Estudios como el realizado por Geral Leach en 1976, ya denunciaban la absurda situación a la que había llegado la producción de alimentos en los países desarrollados. La cadena alimentaria se había convertido en un proceso asombrosamente intensivo en energía, con una energía útil obtenida al final del sistema alimentario que no solo no era superior a la energía invertida, como lo era en origen, sino que llegaba a rendimientos tan bajos como el 34% de la energía invertida en el caso de Reino Unido (Leach, 1976)

Con el paso del tiempo la situación no ha mejorado: la industrialización de los países emergentes que han adoptado a su vez este tipo de sistema de producción, el aumento de la población mundial, que se ha duplicado en menos de cincuenta años, el excesivo consumo de carne denunciado también por la medicina, las tendencias de marketing que potencian alimentos con una elaboración previa cada vez mayor, y muchos fenómenos más, han hecho que los pocos intentos de mejora en la eficiencia energética en el sector agrario se hayan quedado indescritiblemente cortos. En palabras de Carpintero y Naredo (2006): a pesar de haber transcurrido tres décadas desde aquellas reflexiones, los derroteros seguidos por los sistemas agrarios han acentuado la deuda energética de la agricultura e incrementado los costes ambientales asociados a la actividad agrícola y ganadera

Como puede imaginarse la gravedad de estar inmersos en esta situación es enorme. Hemos establecido un sistema que es increíblemente ineficiente, gastando enormes cantidades de energía que podría ser usada de otra manera o ahorrada directamente. Pero lo más importante es que dado el panorama energético mundial, tan sumamente dependiente todavía del petróleo u otras fuentes de energía no renovable, estamos poniendo en peligro la misma alimentación de la humanidad.

Es esta situación, y la realización de trabajos similares, como el nombrado Leach (1976) o Pimentel (2008) para EEUU, así como Naredo y Campos (1980) que analiza la cadena alimentaria española para los años 1950-1951 y 1978-1979, lo que ha motivado este trabajo. En él se estudiarán el sistema agrario español, es decir, la agricultura y la ganadería españolas, y el consumo energético que requieren para la producción de alimentos durante los años 2008-2009.

Durante todo el trabajo se utilizarán los valores medios de las distintas magnitudes estudiadas, como la producción de trigo o el consumo de agua, entre los años 2008 y 2009. Esto se hace así para compensar en cierta medida las variaciones que pueda sufrir el sistema por motivos aleatorios, como un año de bajas precipitaciones o una mala cosecha de un determinado cultivo.

Por motivos de extensión, el trabajo se centrará en el sector agrario, dejando aparte la continuación de la cadena alimentaria, que seguiría a través del procesado, transporte, embalado y demás procesos hasta el consumidor final.

Para poder estudiar este sistema se hará uso de varias metodologías, usadas desde hace un tiempo por la ecología industrial, concretamente del concepto de exergía, la metodología input-output, y el análisis termoeconómico.

Durante la primera parte del trabajo se explicará brevemente esta metodología, sus fundamentos y sus aspectos útiles de cara al trabajo.

El concepto de exergía nos servirá para estudiar, durante la segunda y tercera parte de este estudio diversos balances exergéticos a varios sistemas del sector agrario. Como se verá más adelante, esto nos dará una idea de la importancia de las aportaciones que se están haciendo a cada sistema y de su eficiencia, que caracterizaremos a través del índice exergético, la relación entre la exergía aportada al sistema y la devuelta por el mismo.

En la segunda parte los balances exergéticos serán de algunos de los subsistemas más importantes del sistema agrario. Entre los propios de la agricultura se estudiarán el trigo, la cebada, el maíz y el arroz. Dentro de la ganadería se estudiarán la ganadería bovina y aviar.

En la tercera parte se estudiará el sistema agrario en su totalidad, a través de los flujos agregados proporcionados por el ministerio de agricultura.

El último apartado de la memoria utilizará la metodología input-output explicada para estudiar la reacción del sistema agrario ante varias posibles medidas o escenarios.

Debido a que se prevé que los resultados de este trabajo sean parte de un estudio a enviar a la revista científica "Ecological Modelling", el proyecto fue realizado en inglés. Es por esto que tanto los apéndices como los gráficos y tablas están en este idioma. Esto no debería suponer una dificultad a la comprensión de la memoria, ya que todos ellos aparecen referenciados y descritos en el texto en castellano.

## 2. Metodología

Aquí se expondrán los métodos que se han usado para obtener los resultados del trabajo, así como su funcionamiento básico, sus conceptos más importantes y las referencias a los distintos anexos donde se profundiza en sus distintos aspectos.

### 2.1. Ecología industrial y herramientas

A la hora de analizar el sistema agrario español desde un punto de vista energético, se hará uso de algunas de las herramientas de la ecología industrial. Por lo tanto deberemos definir en primer lugar qué es la ecología industrial. La ecología industrial es un área multidisciplinar cuyo objetivo es organizar los sistemas industriales de una forma similar a los ecosistemas naturales, e implica una interacción entre industrias (flujos de materia, energía e información) y una relación sostenible con el medio ambiente y la sociedad.

Algunos de los métodos característicos de esta área que se usarán, aunque no sean necesariamente exclusivos de la misma son: el análisis exergetico, la metodología input-output y el análisis termoeconómico.

#### 2.1.1 El análisis exergetico

La contabilidad de flujos y la obtención de su valor son fundamentales para la ecología industrial. La mayor parte de los flujos en cualquier sistema se caracterizan, sea en unidades físicas, como masa, volumen o energía, sea en unidades monetarias. Las unidades físicas presentan la ventaja de ser objetivas, un kilogramo es la misma cantidad de masa sea cual sea el lugar o las condiciones a las que esté referido, pero el inconveniente de no poderse sumar, no pueden mezclarse, por ejemplo, toneladas con kWh. Las unidades monetarias presentan las características contrarias. Su valor no es objetivo, ya que cambia debido a fenómenos como la inflación o el mercado de divisas, pero permiten expresar en la misma unidad flujos que no tengan nada que ver entre sí, además de agregarlos o desagregarlos a voluntad.

Para obtener las ventajas de ambos tipos de unidades utilizamos la exergía. Se define la exergía como una magnitud termodinámica que indica el máximo trabajo teórico que se puede extraer de un determinado flujo con la interacción espontánea de este con el entorno.

El primer principio de la termodinámica nos indica que la energía nunca se destruye, sea cual sea el proceso que atraviese.

$$\Delta E = Q - W$$

A su vez el segundo principio indica que todo proceso real aumenta la entropía del universo.

$$\Delta S = \int_1^2 \left( \frac{\delta Q}{T} \right) + \sigma$$

La exergía aúna los conceptos de entropía y energía, dando cuenta de la irreversibilidad de todo proceso real. Consecuentemente la exergía sí puede ser destruida, y lo será en cada uno de estos procesos.

Otro aspecto importante de la exergía es que nos permite definir la eficiencia exergética. Definiremos la eficiencia exergética como el cociente entre la exergía recuperada del sistema y la exergía aportada al mismo.

$$\varepsilon = \frac{B_o}{B_i}$$

Al contrario que la eficiencia energética, esta medida no solo indica el buen o mal funcionamiento del sistema, sino su relación con el mejor rendimiento posible que puede tener. Para una explicación más detallada de el análisis exergético véase “Appendix A: exergy in industrial ecology”

### 2.1.2. Metodología input-output

El análisis input-output estudia las interdependencias entre los procesos industriales en un sistema económico. Actualmente su uso está muy extendido como método del diagnóstico de sus economías por parte de la mayoría de los países del mundo.

La metodología input-output divide el sistema económico en un número de subsectores y considera el flujo de materiales y energía que entran y salen de cada sector (figura 1.1). En el caso de la ecología industrial a estos sectores se les llama procesos. Cada proceso se representa por un flujo de entradas (recursos) y un flujo de salidas (productos). El conjunto de los procesos y las relaciones entre ellos a través de sus entradas y salidas constituye el sistema. A estas entradas y salidas es a lo que se conoce como *inputs* y *outputs*.

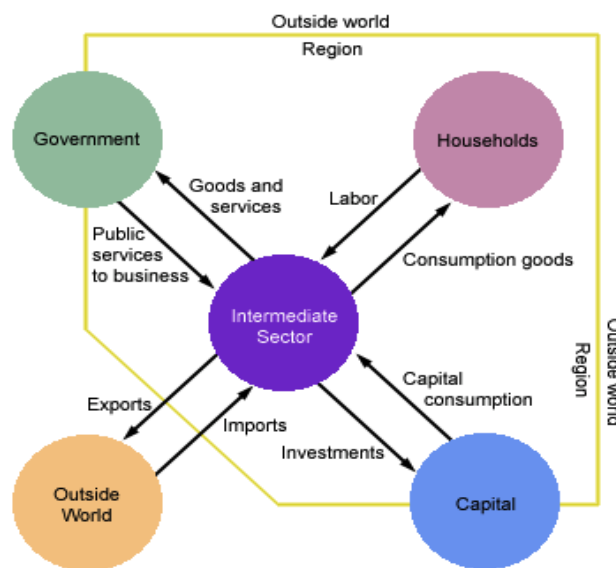


Fig. 1.1 Modelo input-output de una economía estatal

Hoover and Giarratini

Un sistema modelado con la metodología input-output puede expresarse según el ejemplo de la tabla 1.1, donde cada fila corresponde a un sector origen y cada columna a un sector destino, siendo los elementos de la tabla el flujo que se establece entre esos dos sectores.

Sector	1	2	3	4	5	6	7	8	Final demand	Total Output
1	16	5	24	0	6	17	10	0	622	700
2	7	17	11	48	26	0	8	0	203	320
3	43	82	33	13	17	81	51	4	283	607
4	35	9	93	7	19	99	30	2	138	432
5	19	20	19	6	59	16	16	0	220	375
6	15	15	99	45	66	11	12	7	75	345
7	25	22	47	4	42	26	45	1	349	561
8	0	0	75	0	12	7	12	3	78	187
Value added	540	150	206	309	128	88	377	170		
Total input	700	320	607	432	375	345	561	187		

Tabla 1.1 Ejemplo de tabla input-output

[www.implan.com](http://www.implan.com)

Así por ejemplo en la figura mostrada, el flujo (monetario en este caso) del sector 5 al 2 sería de 20 unidades, mientras que el flujo del 2 al 5 sería de 26. La penúltima fila y la penúltima columna indican las interacciones de cada sector con el exterior, respectivamente lo que ha entrado y salido del sistema. Las últimas fila y columna representan la suma de los inputs y outputs de cada sector.

Una de las grandes ventajas de esta metodología es que permiten expresar el sistema en forma matricial. Definimos la matriz de coeficientes  $A_{ij}$  de dimensión  $n \times n$  donde  $n$  será el número de sectores, tal que:

$$A_{ij} = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix}, \quad a_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_j}$$

Donde  $x_{ij}$  es el flujo del sector  $i$  al  $j$  y  $x_j$  el output total del sector  $j$ .

Y esta matriz nos permite calcular, de forma fácilmente implementable en cualquier programa de cálculo, las variaciones en la producción de cada sector ante variaciones de la demanda de cada producto ( $y_j$ ) según la expresión:

$$x_j = (U - A_{ij})^{-1} y_j$$

Para más información sobre el análisis input-output véase “Appendix B: input-output methodology”

### 2.1.3. Análisis termoeconómico

La termoeconomía es la combinación de la economía y la termodinámica para sentar las bases teóricas de una ciencia del ahorro de energía, y obtener así modelos que recojan la limitación que supone no disponer de recursos naturales ilimitados, buscando criterios generales que permitan evaluar la eficiencia y el coste de los productos de sistemas con un consumo intensivo de energía.

La termoeconomía proporciona métodos para evaluar la cantidad y la calidad de las pérdidas de energía y materiales, y para evaluar el coste de estas pérdidas en términos de recursos naturales.

El cálculo de costes es paralelo al análisis input-output, solo que ahora se trabajará con unidades de exergía en lugar de unidades monetarias, que como se ha visto comparten la propiedad de poder agregar flujos variados. Como puede verse esta metodología aúna las dos descritas anteriormente.

Definimos el coste de un bien como la cantidad de recursos que han sido necesarios para producirlo. En términos de exergía:

$$B^* = B + \sum I$$

Donde  $B^*$  es el coste exergético,  $B$  es la exergía del flujo e  $I$  la irreversibilidad de cada proceso.

Esta magnitud es más cómoda de usar en formato adimensional. Definimos el coste exergético unitario ( $k^*$ ) como:

$$k^* = \frac{B^*}{B}$$

Ahora podemos identificar el sistema que queramos estudiar con un modelo input-output en el que cada subsector será llamado un proceso. La suma de todos los outputs de un proceso será el producto ( $P_j$ ) de ese proceso y la suma de todos los inputs será el fuel ( $F_j$ ) del mismo, expresados ambos, por supuesto, en flujos exergéticos. Mediante un desarrollo similar al utilizado en análisis input-output obtenemos la expresión:

$$k^*_j = (U - A_{ij}^T)^{-1} k_j$$

Que nos da los costes unitarios de los productos de todos los componentes  $k^*$  en función de los costes unitarios de los flujos intercambiados con el exterior.

Para más información sobre el análisis termoeconómico véase “Appendix C: Input-output thermoeconomic analysis”



## 2.2. Balances exergéticos

A lo largo de este trabajo se realizan diversos balances de exergía en el sistema agrario español, ya sea de forma agregada o aplicados a subsectores concretos del mismo. Para el cálculo de los balances de exergía de los distintos apartados del proyecto se requiere identificar los flujos de entrada y salida, obtener datos de los mismos y convertirlos a unidades de exergía.

Obtenidos los inputs y los outputs del sistema pueden calcularse la eficiencia exergética y la exergía destruida. También pueden analizarse la importancia relativa de cada flujo, es decir, si es apreciablemente inferior o superior al resto de los flujos implicados.

La identificación de los flujos y la obtención de datos de los mismos se han realizado fundamentalmente a través de los datos publicados por el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA). Otras fuentes importantes consultadas son: la Food and Agriculture Organization (FAO) y el Instituto Nacional de Estadística (INE). Multitud de fuentes adicionales han sido también consultadas cuando ha sido necesario, desde manuales de buenas prácticas agrícolas a publicaciones empresariales sobre el rendimiento de determinadas especies animales. Para una enumeración exhaustiva del origen de estos datos véase “Appendix 4: exergy balances”.

La conversión de los flujos en su correspondiente valor exergético se ha realizado a través de diversos métodos. Se distinguen dos tipos de flujos de cara al cálculo de su valor exergético: los inputs y los outputs.

En primer lugar se tienen en cuenta los inputs del sistema, en este caso se debe tener presente no solo su exergía propia, sino la necesaria para producirlos, como veíamos en el apartado dedicado a la exergía. Esta suma de la exergía propia de un flujo más la requerida por los procesos previos es conocida como exergía acumulada. Entre los inputs más comunes del sistema agrario destacan: el agua, los fertilizantes, la electricidad, el combustible, la maquinaria y las importaciones de piensos.

En la mayor parte de los flujos se ha utilizado una metodología similar a la utilizada por Naredo y Campos(1980). Esta consiste en asignar un valor a la exergía acumulada por unidad de medida de cada input, por ejemplo, 1,7 kWh/m<sup>3</sup> en el caso de inputs de agua. Generalmente estos valores pueden ser obtenidos de la bibliografía disponible y estudios previos realizados.

En algunos casos, en estudios similares a este, se utiliza un sistema de conversión a exergía basado en datos contables. Consiste en hallar la exergía consumida por un determinado sector para su funcionamiento y dividirlo entre sus flujos económicos, de tal forma que se obtiene una cantidad de exergía asociada a cada unidad monetaria. A partir de valores monetarios de sectores parecidos al estudiado pueden obtenerse los flujos de exergía buscados. Aunque estos estudios utilizan este tipo de aproximación en general solo para flujos minoritarios, se ha preferido no usarlo en este trabajo por considerarse un método más propio de un análisis económico que de un análisis exergético. En las situaciones donde estos autores recurrían a este tipo de método se han utilizado otras aproximaciones que se explicarán en el apartado correspondiente.

La exergía de los outputs sí se identifica con la exergía propia del flujo, ya que, de esta manera, puede calcularse la eficiencia exergética como el sumatorio de la exergía saliente entre el sumatorio de la exergía entrante.



## 3. Balances exergéticos específicos

En este apartado se realizan varios balances exergéticos asociados a distintos cultivos y cría de animales. Por un lado estos balances nos serán útiles para obtener una visión más detallada de los sectores que componen el grueso del sistema agrario. Por otro lado la obtención de las distintas eficiencias exergéticas asociadas a ellos nos permitirá comparar varios medios de obtención de alimentos, y tener una idea aproximada de la eficiencia de distintos grupos alimenticios. También nos servirá como paso previo al análisis del sistema agrario en conjunto, que presenta una mayor complejidad.

### 3.1. Balance exergético del trigo

Los datos de la FAO indican que el trigo, el maíz y el arroz son los cereales más cultivados en el mundo, lo que por si solo ya coloca en un importante lugar al trigo. En el caso de España, el más cultivado de entre estos tres es el trigo, siendo el segundo cultivo más extendido, superado solo por la cebada. Sin embargo las razones por la que se ha realizado un balance específico del trigo van más allá de su gran producción.

El trigo, al ser uno de los cultivos más producidos en el mundo, es también uno de los que más ha sufrido el proceso de industrialización de la agricultura y estudiar su actual eficiencia exergética puede ser un caso muy indicativo de las características de esta industrialización.

Este cereal se cultiva en España tanto en secano como en regadío. Esto nos permite estudiar la variación del consumo exergético que supone la aplicación del regadío a un cultivo originalmente de secano.

El balance exergético del trigo tiene también otro papel importante dentro de nuestro estudio, ya que es el más significativo de los cereales importados para consumo animal. Esto hace importante establecer los requerimientos exergéticos de este cultivo a la hora de calcular el input exergético asociado a este flujo en nuestro balance exergético total.

Además, el caso del trigo es especialmente interesante porque nos da una idea de la eficiencia exergética básica del sector agrario español. Este cereal, como base de la alimentación española durante siglos, debe seguir produciéndose sea cual sea la situación, para cubrir las necesidades energéticas mínimas de la población. Incluso si se produjera una crisis energética tal que obligara a abandonar o reducir la producción de otros alimentos menos eficientes, la producción de trigo no puede detenerse. Por lo tanto nos da una medida de la eficiencia exergética a la que podría tender el sistema agrario en una situación de deficiencia energética, siempre considerando que el sistema de producción no cambiase.

#### 3.1.1. Balance exergético del trigo en agricultura de secano

Como se trata del primer balance introducido, y para clarificar los datos, se expone la hoja de cálculo del balance exergético que solo se volverá a mostrar para el caso del cálculo global del sector agrario. También se detalla la obtención de la exergía de cada flujo. El resto de los balances y cálculos similares pueden consultarse en “Appendix D: exergy balances”

Wheat 2008-2009		Dryland farming	
		2008	2009
Production [kt]		5568	3700
Cultivated surface [kha]		1779	1529
Total average electromechanical exergy [toe]			2.425.244
Electromechanical input [toe]			231.870
NPK 8-15-15 cumulative exergy [toe/t]			0,35
Urea 46 cumulative exergy [toe/t]			1,71
Fertilizer cumulative exergy [toe/ha]			0,33
Wheat fertilizer total exergy [toe]			553.061
Wheat exergy [kcal/kg]			3.420
Total exergy input [toe]			784.931

*Tabla 2.1 Balance exergético del trigo de secano*

En la tabla 2.1 se aprecia como se han ido calculando los distintos inputs hasta obtener un input total que pudiera compararse con el valor exergético de la producción de trigo.

En primer lugar se ha obtenido el consumo eléctrico total de la agricultura española en los años 2008 y 2009 a través del anuario de estadística del ministerio de agricultura (MAGRAMA, 2011). Para obtener el coste exergético asociado a esa energía eléctrica se utiliza el multiplicador 3,6 (Naredo y Valero, 1999)

Luego se ha hallado el consumo de exergía asociada a los tractores comprados en ese periodo de tiempo, considerando todos los tractores como tractores medios cuya exergía asociada puede obtenerse a través de ecoinvent (Classen, 2007) multiplicado por el numero de tractores comprados (MAGRAMA, 2011) La tercera parte de lo nombrado en el balance como input electromecánico es el consumo de gasoil de los tractores (MAGRAMA, 2011) por el multiplicador asociado al coste de extracción, distribución y otros, del gasoil, que es de 1,134 (Leach, 1976)

Obtenido el input electromecánico de toda la agricultura, se ha asumido, a falta de datos precisos, que el consumo de esta exergía es proporcional al número de hectáreas cultivadas. Esto permite hallar el input concreto del trigo como el input total por la fracción de hectáreas de trigo entre las hectáreas totales cultivadas en España.

El segundo input es el fertilizante. La cantidad y proporciones de fertilizante N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y K<sub>2</sub>O (NPK) para la resiembra, y urea para cobertera, requeridos por hectárea de trigo de secano en un suelo de fertilidad media han sido obtenidos de la guía de fertilización racional (MAGRAMA, 2008). Estas cantidades fueron multiplicadas por el número de hectáreas de trigo y el valor de la exergía acumulado en la producción de cada uno de estos productos químicos (Zornitza, 1998). Todo esto nos permite obtener el total de exergía en forma de fertilizantes requerida por el subsistema de producción de trigo en España.

Se calcula después el valor exergético del output de trigo. Esta exergía se obtiene de multiplicar la producción de trigo (MAGRAMA, 2011) por su valor calórico (USDA, 2013).

Al dividir el output entre la suma de los inputs obtendremos el índice exergético, que es el inverso del coste exergético unitario.

Del balance resulta un índice de 2,02. Es decir por cada caloría que invertimos en forma de exergía exterior, obtenemos dos calorías en forma de trigo. El índice exergético puede ser mayor que 1 porque la exergía del sol no se tiene nunca en cuenta en este tipo de estudio. La exergía que nos resulta de interés es siempre aquella que aportamos los humanos de nuestras fuentes de energía. El resultado obtenido es bastante alto, no con respecto a la agricultura tradicional, donde podían obtenerse índices de hasta 25 (Leach, 1976), pero sí con respecto al valor medio del sistema agrario o de otros cultivos. Esto se debe a que el aporte de agua es un flujo exergético considerable que no se está usando al tratarse de un cultivo de secano.

### 3.1.2. Balance exergético del trigo en agricultura de regadío

Al cambiar de trigo de secano a trigo de regadío, obtenemos, a través de un nuevo balance, un índice exergético de 1,1. El cambio respecto al trigo de secano es muy sustancial. Para entender mejor la relación entre estos dos sistemas se ilustra en la figura 2.1 a continuación, las entradas y salidas de ambos sistemas. Los flujos han sido expresados respecto de un output común de una tonelada equivalente de petróleo (tep en español, toe en inglés), es decir en forma de costes exergéticos.

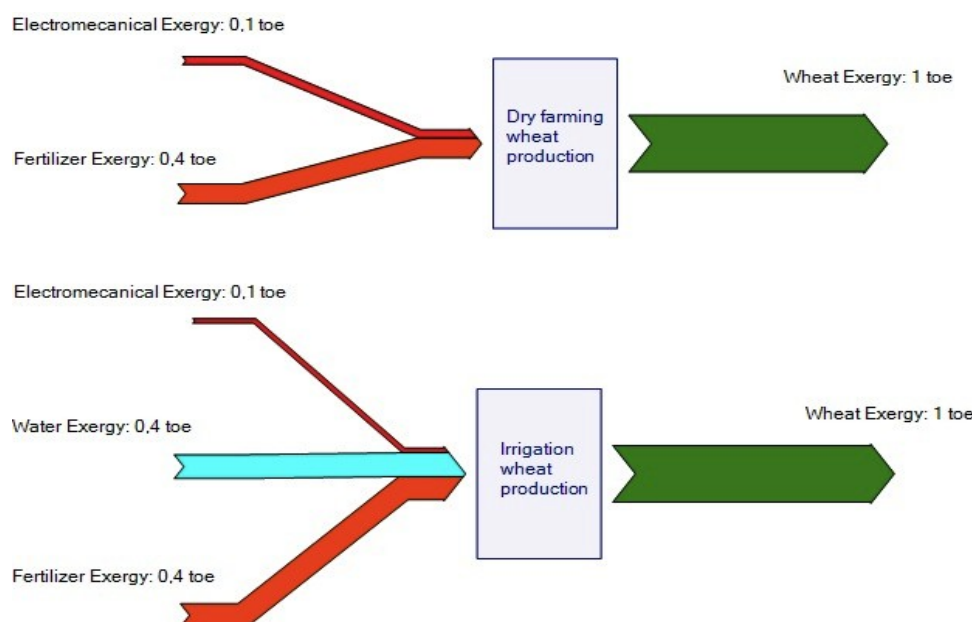


Figura 3.1 Comparativa entre trigo de regadío y trigo de secano

Puede verse como al utilizar sistemas de regadío se aumenta la productividad por hectárea, pero se disminuye ampliamente la eficiencia exergética del cultivo. La cantidad de fertilizante, que es directamente proporcional a la exergía de su flujo, permanece constante en ambos casos. Esto tiene bastante sentido, ya que una planta que crezca el doble, requerirá aproximadamente el doble de fertilizante y producirá aproximadamente el doble de exergía en forma de alimento. Por lo tanto es de esperar que este flujo no cambie. Cabe también esperar que la exergía directa o electromecánica, la proveniente de electricidad, gasóleo y maquinaria, se reduzca en el caso del regadío, pues esta relacionada con las hectáreas trabajadas. En efecto se reduce ligeramente, si bien la variación es muy pequeña, apenas apreciable en el diagrama. Es el efecto del flujo de agua el que diferencia ambos cultivos. Para poder aumentar la producción debe suministrarse al trigo agua adicional para su desarrollo, que este ya no es capaz de obtener por si mismo. La exergía asociada a ese flujo de agua es un importante input adicional que, exergéticamente hablando, debe pagarse sin obtener nada a cambio, lo que reduce considerablemente el índice exergético.

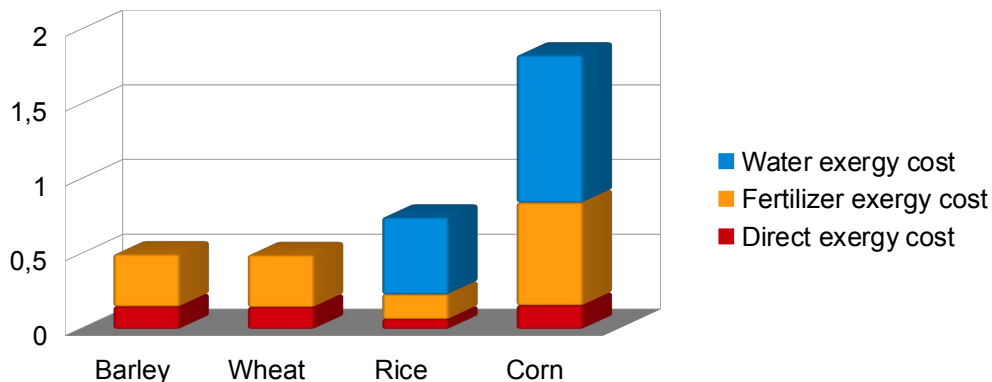
### 3.2. Balances exergéticos de otros cultivos significativos

En esta sección se exponen los resultados de los balances realizados para los dos cultivos mundiales más importantes que faltan, el arroz y el maíz y para el cultivo más importante de la agricultura española, la cebada. En este caso no es necesario dividir los cultivos en regadío y secano. El arroz solo se cultiva en regadío, mientras que la cantidad de cebada cultivada en regadío y la cantidad de maíz cultivado en secano son muy reducidas. Los cálculos detallados se pueden ver en “Appendix D: exergy balances”

Al realizar el balance del arroz obtenemos un índice exergético de 1,34 que es un resultado bastante bueno para un cultivo que requiere un input de agua tan grande como este.

El maíz, a pesar de tener una productividad por hectárea enorme (unas 10,8 toneladas por hectárea, más del triple respecto a la del trigo), revela un índice exergético de apenas 0,55. Este caso es especialmente significativo, ya que el maíz es el cultivo que más atenciones ha recibido durante la industrialización de la agricultura, y es el cultivo primario en el país abanderado de esta tendencia, EEUU.

La cebada cultivada en secano tiene un índice exergético de 2, casi idéntico por lo tanto al del trigo, su productividad por hectárea es también cercana a la de este, si bien no igual. Su gran cultivo se debe tanto a su uso como alimento para ganado, especialmente porcino, como a su utilidad para la elaboración de mostos para diversas bebidas alcohólicas. Para ilustrar mejor estos datos se puede plantear una comparación entre los distintos costes exergéticos unitarios.



*Figura 2.2 Comparación entre inputs exergéticos agrícolas*

La figura 2.2 nos muestra gráficamente esta comparación. Sorprendentemente, a pesar de que el uso de fertilizante es del orden de un 10% distinto por hectárea entre ambos casos, y que el valor calórico y la productividad por hectárea tampoco son iguales, los costes exergéticos del trigo y la cebada son iguales hasta el orden del 1%, variación que por supuesto es inapreciable en el diagrama. Esto nos permite concluir que el trigo y la cebada son equivalentes exergéticamente en el sistema agrícola español. Al ser los dos cereales usados mayoritariamente para elaboración de piensos, esto nos será de gran utilidad a la hora de calcular los inputs exergéticos asociados a la alimentación de distintos animales.

### 3.3. Balances exergéticos del ganado bovino y aviar

Como último apartado dentro de los balances específicos conviene dedicar un momento a la producción ganadera. Como ejemplos se han elegido el ganado bovino y aviar, por sus enormes diferencias en cuanto a eficiencia dentro de los procesos de obtención de productos cárnicos.

El balance del ganado bovino en España proporciona un índice exergético de aproximadamente 0,11, concretamente 10,65%. Esto implica, por lo tanto, que su coste exergético es más de dieciocho veces superior al del trigo. O lo que es lo mismo, que con la energía que se utilizaría para alimentar una persona a base de ternera se podría alimentar a dieciocho personas a base de trigo. Hay muchos motivos por los que este rendimiento es tan bajo. Por un lado el consumo de alimento por parte del ganado bovino es muy alto. Tradicionalmente esto no era un problema, ya que el ganado se alimentaba en praderas donde la agricultura no era viable, a través de especies vegetales no consumibles por el hombre. Pero la ganadería intensiva favorece el uso de piensos con abundancia de cereales consumibles por el hombre, con un gran valor calórico. Además, debe tenerse en cuenta el índice de conversión. El índice de conversión, una medida muy utilizada en ganadería, es la cantidad de alimento, en unidades de masa, que debe suministrarse a un animal para que su peso aumente en una unidad de masa. En el caso del ganado bovino este índice es particularmente alto. Su valor exacto depende de muchos factores, pero podemos utilizar un valor orientativo de 5. Esto implica que la vaca es un sistema intrínsecamente ineficiente a la hora de transformar alimento en carne. Merece la pena destacar que al calcular el índice exergético del ganado lechero el resultado es considerablemente distinto. El índice obtenido es de 0,61, superior, por ejemplo, al del cultivo de maíz.

El estudio del ganado aviar revela una eficiencia mucho mayor que la del ganado bovino. El índice exergético para la producción de carne de pollo es de 0,39. Todavía es bajo en términos generales ya que sigue tratándose de producción de carne, pero es una eficiencia casi cuatro veces superior a la de la carne de ternera. El motivo fundamental para esta mayor eficiencia podemos encontrarlo en el índice de conversión, que en el caso de pollos variedad broiler, la más común para engorde, es de aproximadamente 1,8.

Para mostrar mejor la diferencia entre estos dos consumos de carne la figura 2.3 compara la producción de carne de ternera y de pollo en España con la energía dedicada a cada tipo de producción. Se observa como la producción de ternera es muy inferior a la de pollo, pero el consumo exergético del sector bovino es muy superior al del aviar.

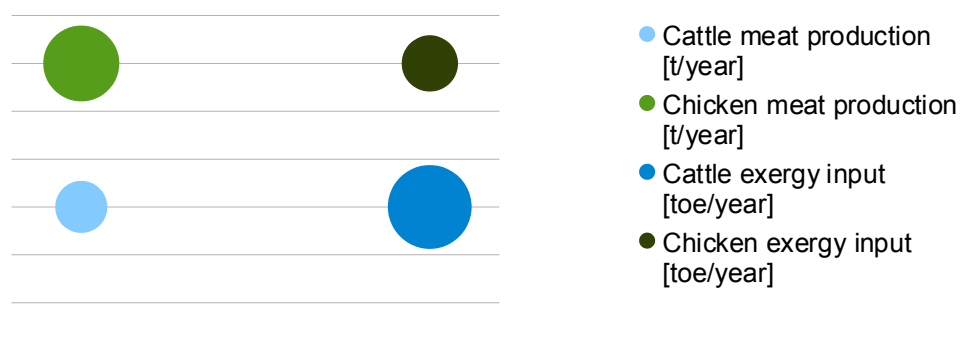


Figura 2.3 comparación producción/necesidades ganado bovino/aviar



## 4. Balance exergético total

En esta sección se analizan los resultados obtenidos para el sector agrario español tomado en forma agregada. La tabla 4.1 expone los inputs y outputs considerados así como la exergía neta, la diferencia entre la exergía aportada al sistema y la devuelta por el mismo. Los datos de partida para el cálculo han sido obtenidos del anuario de estadística (MAGRAMA, 2011). Para el cálculo desarrollado puede consultarse “Appendix D: Exergy balances”

### Aggregated exergy balance 2008-2009

#### Exergy inputs [ktoe]

Water	2.285
Fertilizer	3.502
Machinery	134
Electricity	1.368
Fuel	923
Fodder importation	1.864
Total	10.077

#### Exergy outputs [toe]

Animal	2.051
Vegetal	5.146
Total	7.197

Net exergy [toe] -2.880

Exergy ratio 0,71

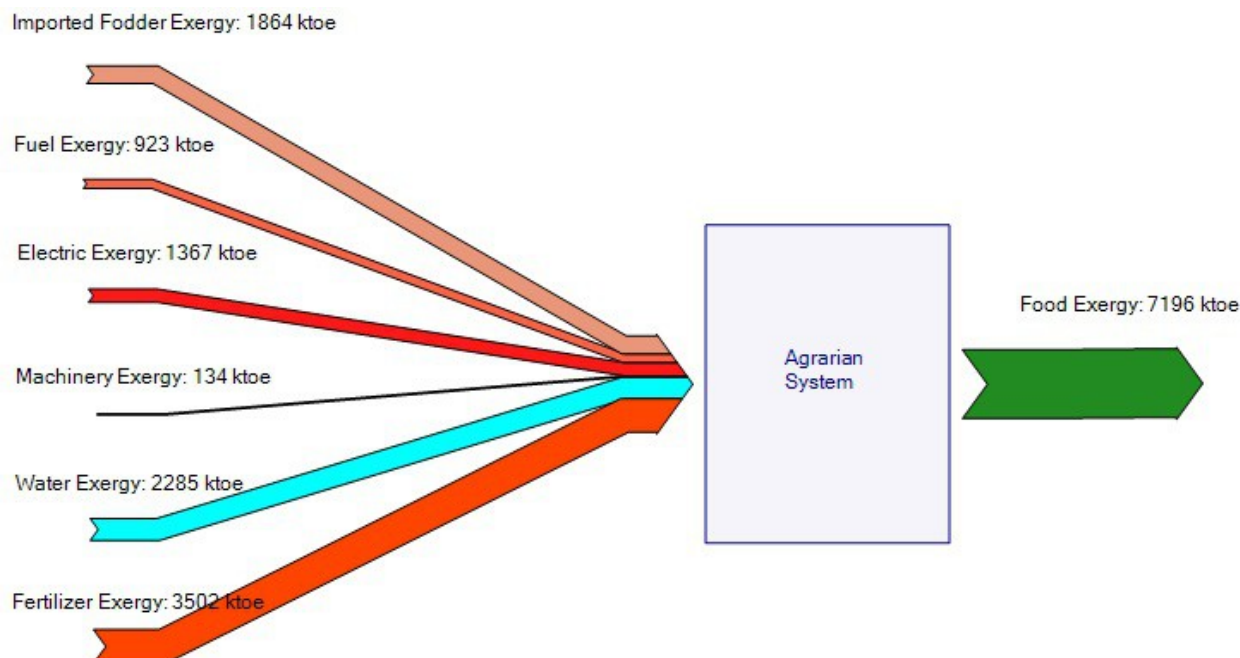
*Tabla 4.1 Balance exergético del sistema agrario*

Como puede verse, se obtiene un índice exergético de 0,71 para el sistema agrario tomado en conjunto. La pérdida de exergía en el sistema, respecto de la invertida activamente, es de 2,88 millones de tep.

Respecto a los flujos del sistema, la figura 4.1 nos permite hacernos una idea más visual del orden del orden de los mismos y su magnitud relativa.

Entre los inputs exergéticos, aparece en este caso uno propio del sistema agregado, las importaciones de cereales para piensos. Es sorprendente observar cómo a pesar de la gran producción de cereales que se produce en España, es todavía necesario importar cerca de diez millones de toneladas de este producto para satisfacer el consumo (INE, 2009)

El input más destacado con diferencia es el consumo indirecto de exergía asociado al uso de fertilizantes. Esto se debe a que la producción de fertilizantes es un proceso muy intensivo en energía, por lo que la exergía acumulada de estas sustancias es también muy alta, sumado a la gran cantidad de fertilizantes que se utilizan en sistema agrario, más de un millón de toneladas en total (Anuario estadística MAGRAMA, 2009).



*Figura 4.1 Modelo reducido input-output del sistema agrario*

La exergía asociada al gasóleo consumido en las explotaciones agrarias, fundamentalmente por los tractores, es relativamente reducida. Como puede observarse, es tan solo el segundo input menos importante.

El input constituido por la exergía acumulada en la fabricación de la maquinaria agrícola se ha tenido en cuenta en el cálculo, pero se trata del más pequeño de los flujos del sistema.

La electricidad es un input nada despreciable en el sistema agrario, esto no resulta sorprendente en un sistema industrializado como este que utiliza la energía eléctrica para multitud de funciones.

La exergía aportada al sistema a través del suministro de agua resulta ser de gran importancia. Como veíamos en la comparación entre trigo de secano y regadío, la agricultura puede convertirse en un enorme sumidero para este tipo de exergía cuando el regadío se utiliza en exceso.

## 5. Análisis de sensibilidad

En este apartado usaremos el análisis termoeconómico para plantear una serie de escenarios que puedan suponer una mejora en la eficiencia energética del sistema agrario español y ver cuáles de entre ellos producen un efecto mayor.

Debido a la potencia del análisis termoeconómico pueden plantearse formas más complejas de modelar los sistemas que las utilizadas hasta ahora. En concreto, el sistema que usaremos para este apartado, utiliza los análisis realizados previamente para los subsistemas ganadería bovina y ganadería aviar para crear un modelo input-output que nos permita estudiar el impacto de variaciones en el sistema, especialmente en aquellas relacionadas con el consumo de carne.

El modelo utilizado puede verse abajo en la figura 5.1. Entre las diferencias respecto al modelo agregado podemos ver que se ha considerado como flujo aparte el aporte de energía necesario para el transporte hasta España del pienso importado. También se han separado del sistema principal la producción de carne bovina y aviar. Estos subsistemas se refieren solo a la producción de carne, el ganado lechero y la avicultura de puesta no han sido separadas del agregado. Algunos flujos resultaban difíciles de apreciar en el diagrama debido a su reducida magnitud. Por esto, la exergía asociada al consumo de electricidad, maquinaria y combustibles está representada conjuntamente por el flujo “exergía directa”. Como se aprecia en la figura, ahora cada uno de los subsistemas bovino y aviar recibe un input en forma de pienso por parte del sistema agrario y otro en forma de exergía directa desde el exterior, produciendo un output al exterior igual a la carne obtenida en unidades exergéticas.

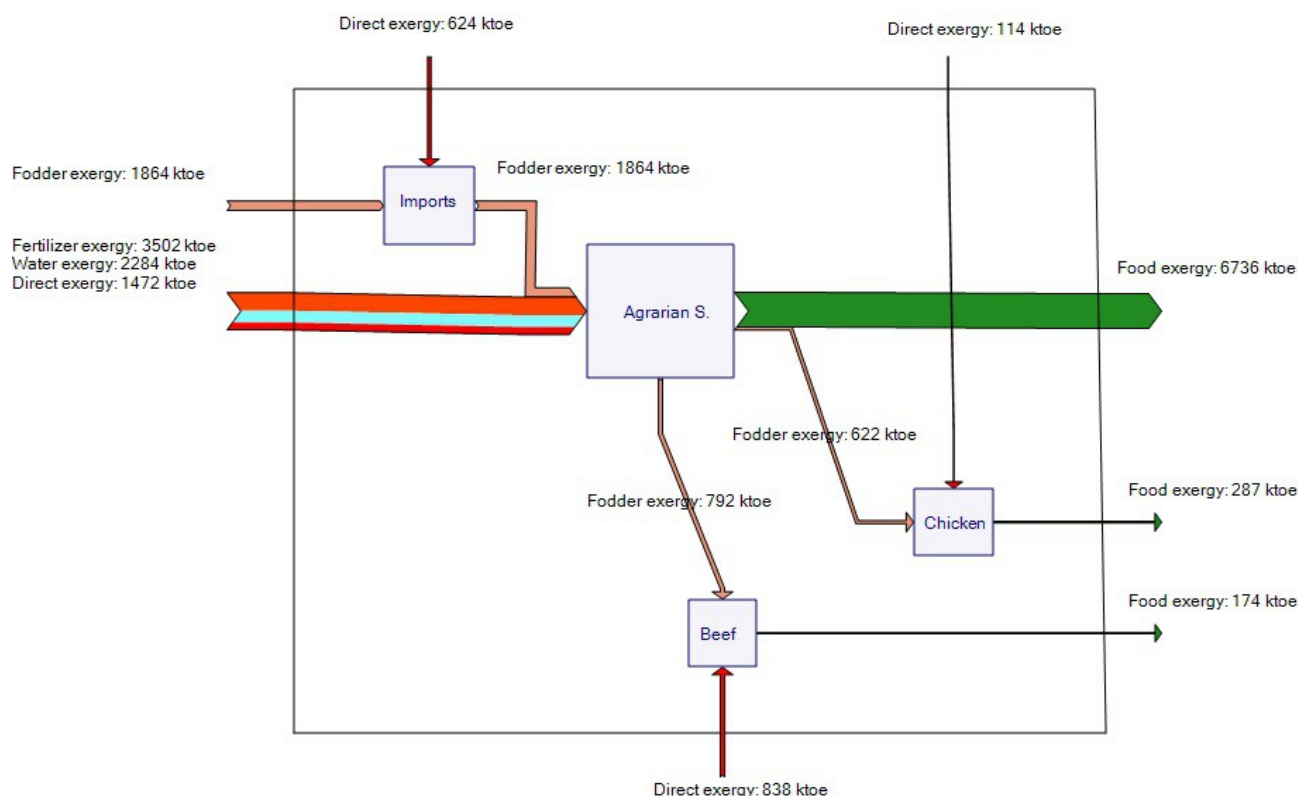


Figura 5.1 Modelo parcialmente desagregado del sistema agrario

## 5.1. Cálculos previos

Ahora vamos a aplicar la metodología explicada en el apartado 2.1, el análisis termoeconómico input-output, al modelo expuesto arriba.

En primer lugar escribimos la tabla input-output correspondiente a la figura 5.1. Esta tabla puede verse a continuación, tabla 5.1.

Input-output table	Imports	Agrarian	Poultry	Cattle	E. Outputs	T. outputs
Imports	0	1864	0	0	0	1864
Agrarian	0	0	622	792	6736	8150
Poultry	0	0	0	0	287	287
Cattle	0	0	0	0	174	174
E. Inputs	2488	7260	114	838		

Tabla 5.1 Tabla input-output del sistema agrario parcialmente desagregado

Según los pasos de cálculo vistos con anterioridad hallamos los costes unitarios  $k^*$  y la matriz de Leontief del sistema (L), que en análisis termoeconómico también nombrábamos como  $\langle |P\rangle$

$$L = \begin{pmatrix} 1 & 0,229 & 0,496 & 1,043 \\ 0 & 1 & 2,169 & 4,561 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad k = \begin{pmatrix} 1,335 \\ 1,196 \\ 2,991 \\ 10,286 \end{pmatrix}$$

Los costes exergéticos unitarios  $k^*$  nos dan una visión condensada de la relación entre las distintas eficiencias, mostrando, de arriba a abajo, los costes exergéticos del sistema de importación de cereales (1,335), el sistema agrario (1,196), el ganado aviar (2,991) y el bovino (10,286). Podemos observar también a través de los costes exergéticos unitarios que el rendimiento del sistema agrario es ahora bastante elevado respecto a los costes que están apareciendo en el trabajo. Tan solo hacen falta 1,196 unidades de exergía aportada para obtener una unidad de exergía en forma de alimento. Es normal que el rendimiento ahora sea superior, ya que se han separado de él dos procesos intrínsecamente muy ineficientes, como lo son los procesos de producción de carne.

## 5.2. Escenario 1. Reducción del consumo de carne

Estudiemos ahora qué efecto tendría sobre los flujos del sistema la reducción del consumo de carne. Supongamos que, ya sea por motivos de salud o de concienciación ecológica, se consiguiera reducir el consumo de carne de pollo y ternera en un 10%, que sería sustituido en la alimentación de los españoles por un aumento exergético proporcional del resto de los outputs del sistema agrario. Lo que implicaría un mayor consumo de verduras y cereales fundamentalmente. Debe tenerse en cuenta que ese 10% del consumo de carne es un 0,6% del output total del sistema agrario, 46 ktep en unidades absolutas.

$$\bar{y} = \begin{pmatrix} 0 \\ 6782 \\ 258 \\ 156 \end{pmatrix}$$

El vector  $y$ , los outputs del sistema con el exterior, a cambiado según esta suposición como se ve arriba, y el vector  $x$ , la producción de cada uno de los flujos, cambiará también, obteniéndose su valor a través de la matriz de Leontief según la metodología input-output:

$$\bar{x} = L * \bar{y} = \begin{pmatrix} 1842 \\ 8055 \\ 258 \\ 156 \end{pmatrix}$$

Es decir que tanto las necesidades de cereales importados como la producción de todo el resto del sistema agrario se reducen en un 1,2%, a pesar de que el sistema agrario reducido de nuestro modelo debe suministrar ahora la exergía que no está obteniendo el consumidor de esa carne. Respecto a la reducción en los inputs externos del sistema, esta será proporcional a la reducción en los outputs, un 1,2% en el caso de importaciones y el sistema agrario parcial y un 10% en los otros dos. Se produce por lo tanto una reducción en el input exergético total de 212 ktep. Un 2% de los inputs totales externos del sistema.

### 5.3. Escenario 2. Sustitución del consumo de carne

En este otro escenario supondremos que se reduce en un 20% el consumo de carne de ternera y se sustituye por carne de pollo. Esto implica modificar el modo en el que se obtienen 35 ktep del output total del sistema, es decir, un 0,48% del output total. Al modificar consecuentemente el vector  $y$  de demanda exterior y aplicar la matriz de Leontief obtenemos una nueva producción de forma similar al punto anterior.

Esta nueva producción supone una reducción en el output necesario del sistema agrario parcial del 1% y un aumento de la producción de carne de pollo del 12%. Esto se reflejará en los inputs exteriores en una reducción total de 251 ktep, un 2,35% del input exterior total del sistema.

### 5.4. Escenario 3. Eficiencia energética

Supongamos en este escenario que se toman medidas para la reducción del consumo directo de exergía, como la conducción eficiente de los tractores y cosechadoras para ahorrar combustible, mejora de las instalaciones térmicas de las granjas para ahorrar propano o sustitución de equipos por equivalentes de bajo consumo con un menor input eléctrico. Establecemos una reducción en los inputs de exergía directa de un 10%.

La reducción de inputs aplicada produce una disminución del consumo total del sistema de 242 ktep. Esta cantidad es equivalente a un 2,26% del input exterior total del sistema.

## 5.5. Escenario 4. Modificación de sistemas de regadío.

Podemos ver ahora lo que ocurriría si se utilizan tecnologías alternativas, como el riego por goteo en lugar del riego a manta, o mejoras en la red de distribución de agua, para reducir el consumo de agua en un 10%.

En este caso obtenemos un valor de 229 ktep inferior de necesidades del sistema, lo que supone un descenso de los inputs totales del sistema del 2,13%

## 5.6. Escenario 5. Revalorización de residuos ganaderos

Se estudia ahora que impacto tendría en el sistema la sustitución de un 10% del consumo de fertilizantes por abonos naturales provenientes del sistema ganadero.

La disminución del uso externo de fertilizantes supondría rebajar el total de los inputs exergéticos del sistema en un 3,27%, o lo que es lo mismo, 350 ktep.

## 5.7. Comparación de escenarios

Comparemos ahora la efectividad de las distintas medidas planteadas. La figura 5.2 expresa la sensibilidad del input total del sistema respecto a la variación del flujo propia del escenario considerado. Es decir, como el input total del sistema se reduce en 2,26% al reducir el consumo de exergía directa en un 10%, su sensibilidad será del 22,6%, y así sucesivamente.

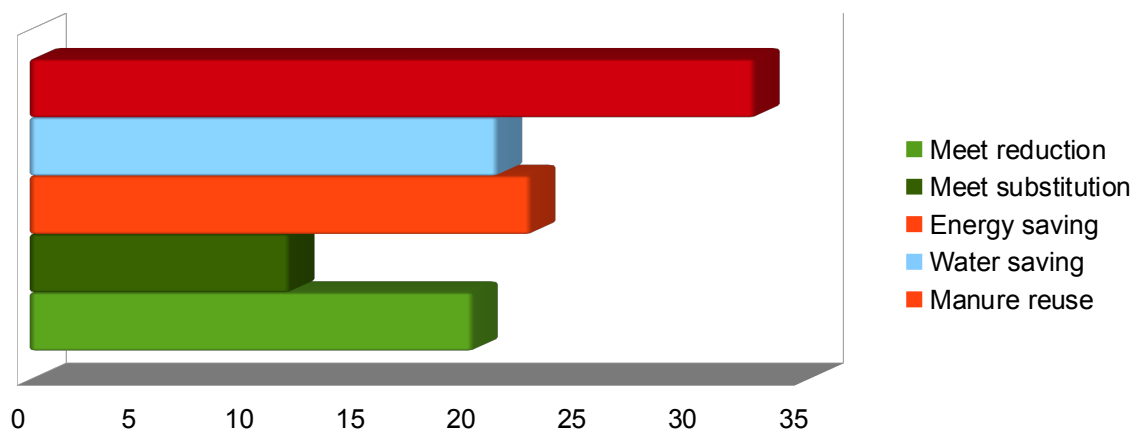


Figura 5.2 Comparación de la variación ante distintos escenarios

## 6. Conclusiones

En el trabajo se han estudiado los balances exergéticos de distintos subsistemas del sistema agrario. El trigo, la cebada, el arroz, el maíz, la producción de leche de vaca, de carne de ternera y de carne de pollo. Obteniéndose unos índices exergéticos que van desde el 2,02 para el caso del trigo hasta el 0,11 para la producción de carne de ternera. Se ha realizado el balance exergético del sistema agrario agregado y se ha realizado un análisis termoeconómico del sistema agrario, desagregando del total la importación de piensos, la producción de carne de pollo y la producción de carne de ternera. De esta forma se ha podido estudiar la reacción del sistema ante diversos escenarios propuestos, como medidas de ahorro energético o de variación de la dieta.

Entre las conclusiones del trabajo que merece la pena destacar está el valor obtenido para el índice exergético del sistema agrario, 0,71. Esto quiere decir que necesitamos gastar, en media, 1 caloría en forma de petróleo u otra fuente de energía por cada 0,71 calorías que queremos destinar a la alimentación humana. Este valor, comparado con los índices exergéticos propios de la agricultura que ha sostenido al ser humano durante milenios, que se estima en alrededor de 25 (Leach, 1976) supone una clamorosa llamada de atención respecto a la forma en la que estamos obteniendo nuestro alimento. Este valor concuerda razonablemente con el valor que aparece en Carpintero y Naredo (2006) para el periodo 1993-1994, en donde el resultado es 0,84, y el resultado menor indicaría una tendencia a la baja en el rendimiento. También debe tenerse en cuenta que en este análisis sí se ha tenido en cuenta la exergía asociada al agua, al contrario que en Carpintero y Naredo (2006). El resultado es bastante mayor que el obtenido por Leach (1976), en donde es un 0,34. Sin embargo, esta disparidad es fácilmente entendible, ya que Leach considera todos los procesos hasta el consumidor, no solo el sector agrario. Un mayor número de procesos (transporte, procesado, preparado, etc.) implicarán una mayor destrucción de exergía y por lo tanto un índice exergético menor.

También merece la pena resaltar como conclusiones obtenidas a lo largo del trabajo el enorme consumo exergético que suponen los consumos de agua y fertilizante y la sorprendente ineficiencia intrínseca al consumo de carne. Intuitivamente, lo primero en lo que se podría pensar al intentar hacer más ecológico un sistema es reducir el consumo eléctrico o de combustible. Sin embargo el análisis de sensibilidad muestra como la sustitución (no eliminación) de un 10% del consumo de carne por vegetales o cereales, produce un efecto casi idéntico al ahorro (eliminación) de un 10% del consumo de electricidad, combustible y maquinaria.

Por todo esto es de una gran importancia que la sociedad se de cuenta del modo insostenible en que se han pasado a obtener los alimentos para los seres humanos, y se tomen medidas, tanto para evitar el deterioro ecológico, como para garantizar nuestra propia alimentación.





## 7. Perspectivas

La realización de este trabajo tenía como objetivo estudiar las necesidades exergéticas del sistema agrario español actual, su rendimiento y algunas posibles mejoras que pudieran realizarse sobre el mismo. Podemos decir, por lo tanto, que el objetivo ha sido satisfactoriamente alcanzado. Aun así, hay multitud de aspectos en los que se hubiera querido profundizar más y en los que se podría seguir trabajando, como desagregar más el sistema de cara a estudios termoeconómicos más detallados, o estudiar un mayor número de cultivos. El cultivo del olivo, por ejemplo, o el de la naranja, son cultivos importantes dentro del sistema agrario español que hubiera sido interesante estudiar por separado. En lo que se refiere a desagregar más el sistema, el paso lógico siguiente sería la producción de carne de porcino, para así dejar completos los subsistemas más importantes de producción de carne. Ninguno de estos añadidos modificaría los resultados obtenidos en el trabajo, pero podrían aportar información interesante adicional.

Por último debemos nombrar las posibles dificultades encontradas para avanzar en el trabajo. A este respecto, la dificultad más destacada ha sido, sin duda, la obtención de datos. Las fuentes de datos principales al estudiar el sistema agrario español son el INE y el MAGRAMA. El problema es que estos organismos proporcionan, en general, datos orientados a estudios de carácter económico, no termodinámico. Además, la mayor parte de las veces estos datos se presentan agregados lo que dificulta enormemente los balances específicos. El consumo eléctrico del sistema agrario es un buen ejemplo de esta situación, ya que se proporciona en unidades monetarias, no energéticas, y agregado para todo el sistema agrario, sin distinguir entre el consumo de distintos tipos de explotaciones.



## 8. Bibliografía

- AVIAGEN, “Broiler ross, especificaciones nutricionales” [http://en.aviagen.com/assets/Tech\\_Center/BB\\_Foreign\\_Language\\_Docs/Spanish\\_TechDocs/Broiler-Ross-308-objetivos-y-especificaciones.pdf](http://en.aviagen.com/assets/Tech_Center/BB_Foreign_Language_Docs/Spanish_TechDocs/Broiler-Ross-308-objetivos-y-especificaciones.pdf) Consultado febrero de 2013
- CARPINTERO, O. y NAREDO, J.M., 2006. “Sobre la evolución de los balances energéticos de la agricultura española, 1950-2000”. Romanyà/Valls
- CLASSEN, M., 2007, “Techreport”, Life Cycle Inventories of Metals. Final report ecoinvent data v2.0. Swiss Centre for Life Cycle Inventories.
- FAO, 2006, “Fertilizer use by crop” FAO information division.
- IRIMIA, S., ESCUDERO, C., y ALVAREZ, C., 2012, “La eficiencia energética en las explotaciones de ganado vacuno lechero en Galicia” XVI congreso internacional de ingeniería de proyectos, Valencia.
- LEACH, G., 1976. “Energía y producción de alimentos”. IPC Science and Technology Press
- MAGRAMA, 2011. “Anuario de estadística 2010”. Centro de publicaciones MAGRAMA
- MAGRAMA, 2003, “Diagnóstico y análisis estratégico del sector agroalimentario español: Análisis de la cadena de producción y distribución de piensos” Centro de publicaciones MAGRAMA
- MAGRAMA, 2008. “Guía de fertilización racional de los cultivos” Centro de publicaciones MAGRAMA
- NAREDO, J.M. y CAMPOS, P., 1980. “Los balances energéticos de la agricultura española”. En Agricultura y Sociedad. Nº 15. Secretaria General Técnica del Ministerio de Agricultura
- NAREDO, J.M., y VALERO, A., 1999. “Desarrollo económico y deterioro ecológico”. Fundación Argentaria. Madrid.
- OVIEDO-RONDÓN, E.O., 2009, “Ahorro energético en granjas avícolas” XLVI symposium científico de avicultura, Zaragoza.
- PIMENTEL, D. y PIMENTEL, M., 2008. “Food, energy, and society”. CRC press.

SAGER, R.L., 2000, “Agua para bebida de bovinos” INTA EEA.

SIAR, Servicio de información agroclimática para el regadio.  
<http://eportal.magrama.gob.es/websiar/NecesidadesHidricas.aspx>. Consultado febrero de 2013

UCHE, J., MARTINEZ, A., CARRASQUER, B., 2011. “Exergy as a guide to allocate environmental costs for implementing the Water Framework Directive in the Ebro river”. In revision for publication. SDEWES congress special issue, Desalination and water Treatment Journal. Ref. DWT-D11-008.

UNICEN, Facultad de ciencias veterinarias de Buenos Aires, tablas de requerimientos de energía de bovinos. <http://ftp.vet.unicen.edu.ar/html/Areas/Alimentos%20y%20Alimentacion/Ducumentos/2009/Tablas%20Requerimientos%20de%20energia%20bovinos.pdf> Consultado febrero de 2013.

USDA, United States Department of Agriculture National Nutrient Database for Standard Reference. <http://ndb.nal.usda.gov/>. Consultado febrero de 2013

ZORNITZA, K., 1998 “Cumulative exergy consumption in fertilizer production processes” University of chemical technology, Bourgas, Bulgaria.