

## **La perspectiva biofísica del proceso económico: Economía Ecológica**

Jesús Ramos Martín<sup>1</sup>  
(Versión 29/09/03)

### **1. Introducción**

El estudio de la relación entre la actividad económica y el medio que nos rodea es antiguo en economía. No obstante es cierto que últimamente la teoría económica parece haberla olvidado. Es por eso que cuando surgió la disciplina que hoy se llama “economía ecológica” implicó una ruptura con la manera en la que la teoría convencional describía nuestra relación con el medio ambiente.

El presente capítulo no pretende explicar en profundidad qué es lo que se entiende por economía ecológica<sup>2</sup>, sino más bien describir brevemente lo que se cree que son las características principales que la hacen diferente del resto de disciplinas: la inconmensurabilidad de valores, el análisis biofísico, y sus repercusiones en términos de generación de políticas, que la hacen ser un ejemplo de lo que se conoce como “ciencia post-normal”.

La estructura de lo que sigue es, por tanto:

La Sección 2 introduce la relación existente entre el pensamiento de los fisiócratas y los economistas clásicos con el medio ambiente, poniendo el énfasis en su relación con la tierra como fuente de riqueza. La siguiente sección presenta el pensamiento neoclásico. El problema de los residuos y no solo del acceso a los recursos se trata en la Sección 4, mientras que la Sección 5 presenta la influencia de la termodinámica sobre la economía ecológica, poniendo de manifiesto su carácter biofísico. La Sección 6 presenta unas pinceladas de qué se entiende por economía ecológica, y la siguiente sección profundiza en las implicaciones políticas, y por tanto en el concepto de ciencia post-normal, para llegar a unas conclusiones breves a continuación.

### **2. Los fisiócratas y el pensamiento clásico**

Tal y como menciona Proops (1979: 125), la economía no ha tenido en cuenta la energía ni los materiales en ninguno de los paradigmas, aparte de considerarlos como meros “bienes de consumo” o “factores de producción”<sup>3</sup>. Esta falta de consideración no ha sido el caso del medio ambiente en general, y de la tierra en particular. Así, durante la historia del pensamiento económico, los economistas han mostrado su interés en tres temas principales:

- (i) La producción de bienes y servicios y la generación de riqueza a través de la transformación de inputs introducidos desde la naturaleza.
- (ii) La escasez de recursos.
- (iii) Las consecuencias de la producción, por ejemplo la contaminación.

---

<sup>1</sup> Istituto Nazionale di Ricerca per gli Alimenti e la Nutrizione, Italia; y Departament d’Economia i d’Història Econòmica, Universitat Autònoma de Barcelona, correo electrónico: [ramos@inran.it](mailto:ramos@inran.it)

<sup>2</sup> Para eso el lector puede consultar Costanza y otros (1991); Martínez-Alier (1987); Martínez-Alier y Roca Jusmet (2000) y las referencias que allí encontrará.

<sup>3</sup> Mirowski (1989: capítulos 3 y 4) tiene otra opinión y presenta algunas analogías entre la física y la economía, principalmente presentando el “valor” como una sustancia que se conserva en movimiento (1989: 186), en una clara analogía con el concepto de energía.

Los Fisiócratas se centraban en la producción, considerando la tierra como el generador final del valor de las cosas. Ellos consideraban a la tierra como productora, pues nos proporcionaba un excedente que se podía obtener una vez se usaban unos determinados inputs (Christensen, 1989). Así, ellos tenían en mente una analogía entre los seres vivos y el aprovisionamiento de la economía<sup>4</sup>. Es de esta forma que tenemos que interpretar el *Tableau Economique* de Quesnay (1758), en el que intentó aplicar sus ideas Cartesianas al análisis de la generación de la riqueza y del valor (ver Mirowski, 1989 y Cleveland, 1987 para más detalles). Quesnay concluyó que la producción de bienes podía ser vista como una mera transformación de materiales y alimentos extraídos de la tierra (Christensen, 1989), en lo que es, claramente, una interpretación biofísica del proceso económico.

Este enfoque hacia la parte productiva de la economía es lo que distinguió también el pensamiento clásico del neoclásico. El hecho, pero, de que prestasen más atención a la parte productiva no quiere decir que entendieran *completamente* los fundamentos biofísicos del proceso económico. Así, a pesar de que Malthus y Ricardo reconocieron que toda producción hecha por el hombre se basaba en materiales que provenían de la naturaleza, no se dieron cuenta de que se podía decir lo mismo de los productos y procesos naturales. Es decir, en sus explicaciones del proceso económico no se hizo uso de las leyes de la termodinámica, desarrolladas en los años 1840s y 1850s. Con más detalle, usaron la Primera Ley de la termodinámica (conservación de la energía) para explicar la producción de manufacturas pero no la producción que provenía de la tierra, que para muchos de ellos tenía un carácter casi sagrado<sup>5</sup>. No obstante, la introducción del concepto de *estado estacionario* por parte de John Stuart Mill (1866) significó un reconocimiento de los límites que la naturaleza imponía al desarrollo económico, hecho que después ha sido analizado por la economía ecológica<sup>6</sup>. Por otra parte, Malthus (1798) fue el primero que puso de manifiesto la aparente contradicción entre una población creciente y unos recursos escasos, poniendo como ejemplo la tierra cultivable. Este tipo de análisis tuvo continuación más adelante por parte de Jevons (1865) con su clásico ensayo sobre la cuestión del carbón.

A pesar de escribir después de que las leyes de la termodinámica hubieran sido formuladas, Marx no integró el trabajo de Podolinsky, un físico socialista Ucraniano, en su análisis, en lo que puede interpretarse como un error miópico por parte del filósofo<sup>7</sup>. Así, no usó en el desarrollo de su teoría términos de la ecología humana, como los ‘flujos de energía y materiales’, tal y como le recomendó Podolinsky. Si lo hubiera hecho, tanto su teoría del valor como de la evolución de los sistemas económicos habría sido diferente<sup>8</sup>. De hecho, las ideas de Podolinsky eran muy avanzadas para su tiempo.

---

<sup>4</sup> Esta idea de entender la economía como el aprovisionamiento de la *polis* viene de la distinción de Aristóteles entre *oikonomia* y *crematistica*.

<sup>5</sup> De hecho, como dice Mirowski (1989), la ley de Say – la oferta crea su propia demanda – puede interpretarse como una aplicación del principio de conservación mencionado antes.

<sup>6</sup> Daly (1990) distinguió entre crecimiento (incremento cuantitativo en una escala física) y desarrollo (mejora cualitativa o realización de potencialidades), permitiendo la existencia de un desarrollo cualitativo sin la necesidad de crecimiento.

<sup>7</sup> Para un análisis en profundidad de Podolinsky y otros padres de la “energética”, así como una revisión de la relevancia del análisis energético como fundamento de la economía ecológica, véase el libro seminal de Martínez-Alier (1987).

<sup>8</sup> Por ejemplo, si hubiera usado el trabajo de Podolinsky, su concepción de la crisis del capitalismo debido a un deterioro de las “relaciones de producción” habría cambiado hacia los límites impuestos al ulterior

Podolinsky tuvo la idea de modelizar la productividad del trabajo como una función de la cantidad de energía usada para subsidiarlo. También desarrolló el concepto de “retorno energético del input energético (energy return on energy input) bajo el nombre de “coeficiente económico”, y lo aplicó a los seres humanos, llegando a la conclusión de que el hombre tiene la capacidad de transformar una quinta parte de la energía obtenida de la alimentación en trabajo muscular. Este resultado puede ser interpretado como un fundamento biofísico de la teoría del valor. Tal y como dice Martínez-Alier (1987: 51) “en economía Podolinsky pensó que había reconciliado a los Fisiócratas con la teoría del valor trabajo”. Sus conceptos, como resalta Cleveland (1987) han mostrado ser muy poderosos, y han sido usados después por diferentes analistas biofísicos, como Cleveland y otros (1984) y Odum (1971). Es una pena que Marx, el último de los grandes economistas clásicos con interés en el proceso productivo a través de la transformación de diferentes inputs, no hiciera uso de las lecciones del análisis termodinámico para completar su análisis del proceso económico.

### 3. El enfoque neoclásico

El enfoque neoclásico representa un cambio en el paradigma económico en el sentido de Kuhn (1962). Como dice Christensen (1989), a través del uso del modelo de optimización, adaptado de la mecánica analítica, la economía neoclásica cambió el foco de análisis de la dinámica productiva al análisis del valor en cambio<sup>9</sup>. No obstante, Jevons (1865) analizó, en *The Coal Question*, el tema de los recursos limitados como una restricción para el desarrollo, llegando a la siguiente conclusión, un resultado paralelo al incremento en la eficiencia termodinámica en el uso del carbón era el incremento del consumo total de carbón (Martínez-Alier, 1987)<sup>10</sup>. Esta línea argumental fue posteriormente perdida incluso por el propio Jevons, y por otros autores, cuando ignoraron los fundamentos biofísicos del capital, concentrándose en el capital financiero. Esa misma falta de interés por las materias primas puede encontrarse posteriormente en Marshall, a pesar de que fue él quien dijo que “La Meca de todo economista se encuentra en la biología económica más que en la dinámica económica” (1920: xiv).

De hecho, como se ha mencionado antes, la economía neoclásica se centra en el análisis del intercambio de bienes y servicios entre los diferentes agentes económicos, enfatizando el papel de las preferencias del consumidor y la dotación de recursos, con el fin de garantizar el equilibrio de la economía. Esto implica considerar el medio ambiente solo como una restricción más que nos viene dada.

Para entender mejor la economía neoclásica hay que tener en cuenta que sigue a la mecánica clásica en su descripción del proceso económico. Es decir, tanto la producción como el consumo y la distribución son considerados procesos singulares que pueden ser analizados de forma separada, no solo para entenderlos, sino también para hacer predicciones. Como en la mecánica, los economistas buscan encontrar “leyes universales” que pueden ser aplicadas en cualquier momento y en cualquier lugar.

En particular, los economistas neoclásicos interpretan el sistema económico como un

---

desarrollo de las “fuerzas productivas”, impuestos por las leyes físicas y ecológicas.

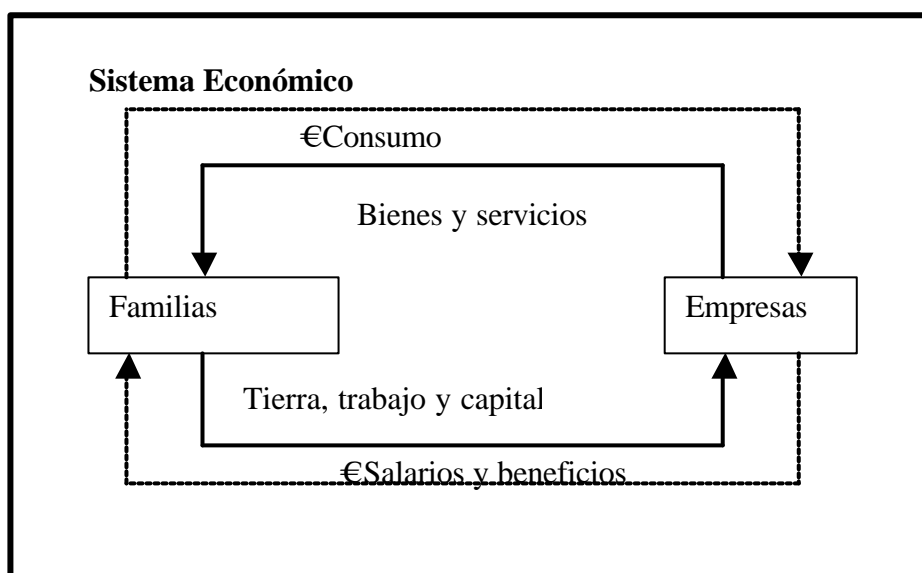
<sup>9</sup> Para un análisis en profundidad de la influencia de la geometría y la física en la economía neoclásica véase Mirowski (1989: capítulos 5 y 6).

<sup>10</sup> Algo que posteriormente ha sido llamado la Paradoja de Jevons por otro académico del mismo nombre (Jevons, 1990)

*sistema aislado*<sup>11</sup> en el que se intercambian unos factores de producción (tierra, capital y trabajo) y unos bienes y servicios entre las empresas y las familias, en lo que se conoce como el flujo circular del valor en cambio (o de la renta). En más detalle, las empresas pagan a las familias por los factores de producción (ingreso nacional), mientras que las familias pagan a las empresas por los bienes y servicios finales (producto nacional). Este círculo es el que se presenta en la Figura 1.

Cuando representamos el proceso económico de esta manera estamos considerando a los recursos naturales, la tecnología, y las preferencias como dados. Es decir, no estamos teniendo en cuentas los fundamentos biofísicos del proceso económico, ni por el lado de la necesidad de recursos, ni por el lado de las consecuencias de la producción y el consumo en la forma de residuos. Es decir, tratamos al sistema económico como si fuera una especie de caja negra (Dyke, 1994).

**Figura 1: El flujo circular de la renta**



**Fuente:** Hall et al. (1986: 39)

El flujo circular del valor en cambio o de la renta considera los recursos naturales como ilimitados. Con su énfasis en la asignación de los mercados, la teoría neoclásica no puede tratar el tema de la escala de la economía respecto al medio ambiente (Daly, 1992). Cuando, más tarde, la economía de los recursos naturales se desarrolló en el marco de la teoría neoclásica (véase Pearce y Turner, 1990; Scott, 1985) trató las amenazas de la escasez y de la contaminación usando las metodologías tradicionales de la economía. Así, los métodos que desarrolló fueron:

- (i) Optimización en el caso de la gestión de los recursos naturales (tanto renovables como agotables).
- (ii) Asignación de derechos de propiedad sobre la contaminación (o más en general sobre las externalidades) para incorporarlas en el sistema de precios, y por tanto en el proceso de decisión dentro del

<sup>11</sup> Un sistema *aislado* es aquél que no intercambia ni energía ni materiales con su medio; un sistema *cerrado* solo cambia energía, pero no materiales; y un sistema *abierto* intercambia tanto energía como materiales con el medio.

mecanismo de mercado.

Lo mismo que sucede con la escala lo encontramos con la cuestión del tiempo. Dado que se sigue la mecánica, en donde todos los procesos son reversibles, sus ecuaciones y modelos son simétricos en el tiempo, es decir que el tiempo puede ser sumado o restado sin que esto afecte al modelo, podemos regresar al inicio, y por tanto no hay irreversibilidad. En este punto es interesante mencionar la distinción que hizo Georgescu-Roegen entre “tiempo” y “Tiempo”. Para Georgescu-Roegen (1971: 135), “*T* representa el Tiempo, concebido como una corriente de la conciencia, o si se quiere, como una sucesión continua de ‘momentos’, pero *t* representa la medida de un intervalo (*T*, *T'*) por un *reloj mecánico* (énfasis en el original).

#### **4. De la limitación de los recursos a la limitación de los sumideros**

Siguiendo la tradición de Gray (1913, 1914) y Hotelling (1931) cuando analizaban la tasa óptima de extracción de un recurso agotable, los economistas de los años 1960s comenzaron de nuevo a analizar la relación entre el proceso económico y el medio ambiente. El trabajo de Barnett y Morse (1963) se toma normalmente como referencia para el inicio de este revival. Este trabajo provocó un duro debate entre los optimistas tecnológicos (que piensan que o bien la tecnología o la sustitución entre recursos resolverán el problema de la escasez), y los pesimistas tecnológicos. El debate se animó con la publicación del informe al Club de Roma, *The Limits to Growth*, por parte de Meadows y otros (1972) y por el embargo árabe de petróleo de 1973 (Costanza, 1989).

No obstante, a pesar de que el debate todavía continúa<sup>12</sup>, se piensa que en el futuro inmediato las restricciones que la naturaleza impondrá al proceso económico no vendrán tanto por la parte de la escasez de recursos como por la imposibilidad para el medio de absorber las cantidades crecientes de residuos generadas por el sistema económico.

### **5. Definiendo los límites: termodinámica**

#### **5. 1. La Primera Ley de la termodinámica**

Como se ha mencionado ya, tanto los economistas clásicos como los neoclásicos se dieron cuenta, aunque de forma parcial y de manera diferente, de los límites que impone la Primera Ley de la termodinámica sobre el proceso económico. Antes, pero, de continuar, repasemos la clasificación de sistemas según se entiende en la física:

- *Un sistema aislado* no intercambia ni materia ni energía con su medio.
- *Un sistema cerrado* intercambia energía pero no materia con el medio.
- *Un sistema abierto* intercambia tanto energía como materia con el medio.

Tanto los sistemas aislados como los cerrados son solo idealizaciones, útiles para desarrollar la teoría, pero en realidad siempre hay algún tipo de intercambio de energía y materiales entre un sistema y su medio (Hall et al., 1986).

La *Primera Ley de la Termodinámica*, o la ley de la conservación de la energía fue

---

<sup>12</sup> La idea optimista de la desmaterialización de la economía (o Curva de Kuznets Ambiental) es defendida por académicos que provienen de la Ecología Industrial (como Von Weizsäcker y otros, 1997) o del Metabolismo Industrial (como Ayres, 1998) que siguen el trabajo anterior de Malenbaum (1978). Pero eso es cuestionado por otros autores más pesimistas (o tal vez realistas) como De Bruyn y Opschoor (1997), De Bruyn (1999), Herring (1999), Jevons (1990), Ramos-Martin (2001).

desarrollada hacia los años 1840s, y nos dice que la energía no puede ser creada ni destruida, sino que se conserva. Tiene muchas implicaciones, como por ejemplo que la energía de un sistema aislado se mantiene constante. Pero en el caso de los sistemas abiertos (como es el caso de los sistemas económicos), implica que la masa de materia que tenemos en un sistema tiene que cambiar en la misma proporción a la diferencia entre la materia que entra en el sistema menos la materia que sale (Ruth, 1993: 51). Esto, en el caso de los sistemas económicos, tiene una importancia fundamental con respecto a los residuos, y a su relación con los inputs.

De hecho, la Primera Ley nos enseña que todos los inputs usados en un proceso productivo se convertirán, al final, en una mezcla de productos finales y residuos (Buenstorf, 2000). Otra aplicación de esta ley se encuentra en el análisis input-output, que, a pesar de no tener en cuenta las interacciones dinámicas entre la economía y el medio ambiente, nos da una descripción de las interacciones entre los diferentes sectores económicos y entre el sistema económico y el medio<sup>13</sup>.

## 5. 2. La Segunda Ley de la Termodinámica

La Segunda Ley de la Termodinámica, o el *principio de la entropía*, es sin duda la pieza de teoría termodinámica que más ha influido en el pensamiento económico.

Antes de continuar, podemos definir la energía como la capacidad de realizar trabajo, en el sentido de la física. El trabajo es, por tanto, una forma de energía, como también lo es el calor. No obstante, las dos son, de alguna manera, diferentes. Tienen diferentes *calidades*. De hecho, todo el trabajo puede convertirse en calor, pero lo contrario no es posible. Así, necesitamos una medida de la calidad de la energía, y esta medida es la *entropía*.

Tal y como nos recuerdan Faber et al. (1996) todos los procesos de cambio consumen (o disipan) energía. Cuando disipamos energía, la energía disponible o libre<sup>14</sup> se transforma en trabajo y calor. Ese calor, no obstante, no puede convertirse de nuevo en trabajo mecánico sin añadir más energía (Hall et al., 1986: 5). Esto es lo que se conoce como la *Segunda Ley de la Termodinámica*. Más específicamente, la ley dice que la entropía (que recordemos es la medida de la energía no disponible) de un *sistema aislado* tiende hacia un nivel máximo. La entropía, por tanto, define diferencias de calidad entre diferentes tipos de energía. Además, la ley nos recuerda que la eficiencia relativa a toda transformación de calor en trabajo es inferior al 100%. Otra definición, en la misma tradición fenomenológica, nos dice que intercambios espontáneos de calor entre dos cuerpos solo pueden tener lugar en una dirección, que es desde el cuerpo caliente al frío, en línea con lo que dice la experiencia (Faber et al., 1996: 99).

En términos teóricos, la entropía se puede definir así (Georgescu-Roegen, 1971: 129, 130):  $\Delta S = \Delta Q / T$  “en donde  $\Delta S$  es el incremento de entropía,  $\Delta Q$  el incremento de calor transferido desde el cuerpo caliente al frío, y T es la temperatura absoluta a la que se hizo la transferencia”.

---

<sup>13</sup> Ver Duchin (1988, 1996), Duchin and Lange (1994), y Duchin and Szyld (1985) para una descripción de la metodología input-output para el caso ambiental, y Proops et al. (1993) para una aplicación para el caso de las emisiones de CO<sub>2</sub>.

<sup>14</sup> En termodinámica clásica se hace la distinción entre energía libre o disponible (que puede transformarse en trabajo mecánico) y energía no disponible o limitada (que no se puede transformar en trabajo mecánico)

Josiah Willard Gibbs clarificó más tarde el concepto de energía, ya que distinguió entre entropía y energía libre o disponible, más tarde conocida como *exergía*. Esta distinción nos permite hablar con más propiedad y entender las definiciones anteriores en otro sentido. Así, cuando en un sistema aislado la entropía es máxima, la exergía tiene que ser por naturaleza cero. La exergía no es, por tanto, una variable que se conserve, como sí lo es la energía. De hecho exergía es lo que la gente cotidianamente llama energía. La exergía puede perderse o adquirirse en cualquier proceso físico (Ayres, 1998) en forma de calor de baja temperatura. Estas características hacen pensar a algunos académicos que la exergía es el verdadero factor de producción limitante. Sería, por tanto, por esta escasez que la exergía debería ser considerada de interés desde un punto de vista económico.

Después de haber introducido el concepto de entropía, ¿cuáles son sus repercusiones para el proceso económico? En primer lugar la ley excluye la reversibilidad de muchos procesos (Faber, 1985). Eso se puede ver claramente de la propia formulación de Clausius de la Segunda Ley, “el calor no puede nunca, por sí solo, ir de un cuerpo con baja temperatura hacia otro con alta temperatura” (citado en Proops, 1979: 35). Esto implica, tal y como ya se ha dicho, que cualquier proceso de la naturaleza dará como resultado un aumento de la entropía. Este resultado hizo que Eddington hablase de la llamada “flecha del tiempo”, según la cual el aumento de la entropía nos determina la dirección del Tiempo en el sentido de Georgescu-Roegen. La implicación ambiental de esto es que cualquier uso de recursos que suponga ir más allá de los ciclos ecológicos dará lugar a una degradación del medio que será irreversible, con las consiguientes consecuencias que eso comportará también para el desarrollo económico.

La segunda implicación es la de la eficiencia, dado que la segunda ley nos introduce los límites sobre la eficiencia a los cuales podemos usar tanto la energía como los materiales (Ruth, 1993). Esto hace que el objetivo de la contaminación cero sea físicamente imposible, especialmente si tenemos en cuenta que el reciclaje es intensivo en exergía. Esto quiere decir que, a pesar del reciclaje, cada vez que ocurre un proceso, más entropía es generada, dado que nunca se puede conseguir una eficiencia del 100% en la conversión.

Un aspecto final a considerar es que gracias al análisis termodinámico podemos decir que la productividad en el uso de los recursos *per se*, que tiene que ver con la eficiencia ecológica, no es suficiente para garantizar la integridad ecológica del sistema (Binswanger, 1993). Es decir, mejoras relativas en el uso de los recursos pueden ir de la mano de aumentos en el uso de los recursos en términos absolutos, y desde un punto de vista ambiental eso es lo que nos importa.

En conclusión, la entropía no tiene que ser vista como una herramienta analítica por parte de los economistas (Faber et al., 1996). Solo debería utilizarse para entender las interacciones entre la economía y el medio ambiente, de una forma conceptual (Binswanger, 1993) de tal forma que entendamos los límites físicos que pone el medio ambiente sobre el proceso económico.

## **6. Economía Ecológica<sup>15</sup>: El sistema económico como subsistema**

---

<sup>15</sup> No es la intención en esta sección describir en profundidad este nuevo campo de conocimiento. Para una descripción histórica del nacimiento de la economía ecológica, véase Martínez-Alier (1987). Para una

## **del sistema natural**

La economía ecológica<sup>16</sup> es un conjunto de disciplinas que se ha venido desarrollando en los últimos años. Toma la producción, o la transformación de la energía y los materiales, como el punto focal de análisis, tal y como había hecho el pensamiento clásico, pero usa en su análisis elementos de la termodinámica. No obstante, esto no quiere decir que no estudie también aquellos temas analizados por la economía neoclásica.

### **6. 1. Introducción: ‘Oikonomia’**

Aristóteles distinguió entre “crematística” y “oikonomía”. Para él, la primera era el estudio de la formación de los precios y del intercambio, algo que nosotros hoy en día relacionamos a lo que se entiende vulgarmente por “economía” en la definición tradicional proporcionada por Robbins (1932). En contraste, oikonomía representaría el análisis del aprovisionamiento material del “oikos” (hogar) o de la “polis” (la ciudad-estado). Por tanto, oikonomía significaría hacer un análisis biofísico del proceso económico. Esto puede llamarse “ecología humana” o “economía ecológica”. Es precisamente este interés en los fundamentos biofísicos del proceso económico, regresando al pensamiento de Aristóteles y de los economistas clásicos, lo que distingue a la economía ecológica de la neoclásica.

### **6. 2. Análisis energético**

Este renovado interés por el análisis biofísico le debe mucho a las contribuciones de analistas energéticos como Podolinsky y Lotka. La contribución de Lotka al debate fue básicamente su afirmación de que la selección natural tiende a:

- (i) Incrementar el flujo de energía que circula a través de los sistemas biológicos, y
- (ii) Incrementar la eficiencia energética de los procesos biológicos.

Más específicamente, las palabras originales de Lotka (1922: 148) fueron que “la selección natural operaría de tal forma que se incrementase la masa total del sistema orgánico, que aumentase la tasa de circulación de materia a través del sistema, y que se incrementase el flujo total de energía a través del sistema siempre y cuando existiera una fracción no utilizada de materia y energía disponible (mi traducción)”. Hay dos enfoques al análisis de Lotka. Uno es el desarrollado por Odum, que defiende la existencia de una ley universal de la evolución. La otra ve la contribución de Lotka sin ningún tipo de determinismo (O’Connor, 1991; Buenstorf, 2000), pero solo como una mera descripción de regularidades pasadas que pueden ayudar a entender la evolución de una manera más fenomenológica.

Odum se refirió al principio de Lotka como el ‘maximum power principle’ (Odum and Pinkerton, 1955), y lo tomó como si fuera una ley universal. Este tipo de argumentos, como dice Martínez-Alier (1987), pueden llevar a ideas cercanas al Darwinismo social<sup>17</sup>, según el cual la explicación del éxito de la especie humana entendido como su

---

presentación de los principales autores y temas de análisis, véase Costanza (1991). Para los últimos desarrollos véase la revista *Ecological Economics* (<http://www.elsevier.com/inca/publications/store/5/0/3/3/0/5/index.htm>), y para otra información véase la página web de la Sociedad Internacional de Economía Ecológica (<http://www.ecologicaleconomics.org>)

<sup>16</sup> A veces también llamada economía biofísica, y después “bioeconomía” por Georgescu-Roegen.

<sup>17</sup> De hecho, el mismo Lotka (1956: 304) puntualizó el hecho de que algunos autores habían intentado



capacidad de aprendizaje para hacer uso de las fuentes energéticas, podría ser extrapolado intraespecíficamente para explicar diferencias en el seno de la sociedad humana. Por contra, el uso de la teoría de la selección natural de forma intraespecífica no debería pasar de la metáfora. O lo que es lo mismo, teniendo en cuenta que “la asignación humana de recursos energéticos y materiales a diferentes usos no puede ser explicada solo por las ciencias naturales. La economía *no debería* llegar a ser solo ecología humana” (Martínez-Alier, 1987: 15-16, énfasis en el original, mi traducción).

En resumen, a pesar de que la economía ecológica se basa también en parte en las ideas de estos analistas energéticos, el análisis de Podolinsky, Lotka u otros, no debe tomarse de forma literal, sino solamente como una metáfora o una herramienta que podemos usar para mejorar nuestro entendimiento del funcionamiento de los procesos económicos desde la vertiente biofísica. Por ejemplo, la distinción introducida por Lotka en primer lugar (1956), y después propuesta por Georgescu-Roegen (1975) como concepto de trabajo para el análisis energético de la bioeconomía y la sustentabilidad, entre flujos energéticos exosomáticos<sup>18</sup> y endosomáticos<sup>19</sup> resulta muy útil cuando analizamos los sistemas humanos. Así, energía exosomática puede significar cosas muy diferentes dependiendo del estado de desarrollo de un país. En un país rico, equivale prácticamente en su totalidad a lo que se conoce como “energía comercial”, mientras que en un país más pobre puede implicar fuentes más tradicionales de energía como la energía animal, el viento, agua, y fuego (Giampietro et al., 2001). Así, algunos autores argumentan que “la razón entre la energía exosomática y la endosomática nos indica hasta qué punto la “tecnología humana” está alimentando la capacidad de los humanos de controlar la producción y el consumo de bienes y servicios. La razón es más o menos 5/1 en la mayoría de economías de subsistencia (dado que se debe al uso de biomasa para el fuego y a la energía animal en cuanto al uso exosomático), mientras que llega hasta valores de 90/1 en los países desarrollados” (Giampietro et al., 2001; véase también Giampietro, 1997)

### **6. 3. El sistema económico como sistema abierto unidireccional**

“La economía ecológica analiza las relaciones entre los ecosistemas y los sistemas económicos en un sentido amplio” (Costanza, 1989: 1, mi traducción). No obstante, no se piensa que sea una “ciencia y gestión de la sostenibilidad” como sí defiende Costanza (1991), sino más bien de la (no)sostenibilidad, dado que la economía ecológica se centra en estudiar lo que no es sostenible.

Central a la economía ecológica es el reconocimiento de que los sistemas económicos no solo afectan al medio ambiente, sino que directamente dependen de las funciones de apoyo a la vida que el propio medio nos provee para nuestra supervivencia. Es decir, hay una relación mutua, una coevolución (Norgaard, 1994; Gowdy, 1994). De hecho, los sistemas económicos utilizan materia y energía para mantenerse y crecer, y es esta producción y consumo de la materia y la energía la que transforma el medio que nos rodea.

---

construir un sistema de “biodinámica (dinámica social)” basado en “la equivocada identificación de los precios y cantidades económicas relacionadas con el factor de la intensidad de la energía”.

<sup>18</sup> Uso de fuentes energéticas para conversiones energéticas fuera del cuerpo humano para el metabolismo social, pero que todavía operan bajo control humano.

<sup>19</sup> Uso de la energía necesaria para el mantenimiento del metabolismo de un ser humano, es decir, conversiones energéticas ligadas a procesos humanos fisiológicos que están alimentados por energía que proviene de la alimentación (Giampietro et al., 2001).

Con estas herramientas de la ecología y de la economía, Odum (1989) distinguió entre tres tipos de ecosistemas:

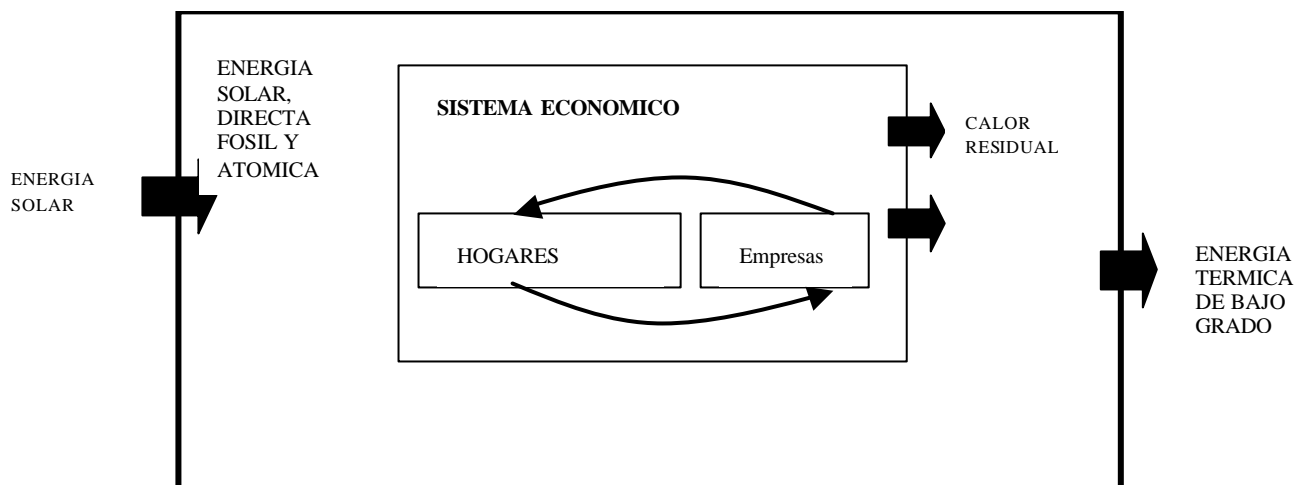
- (i) *Ambientes naturales* o ecosistemas alimentados por la energía del sol. Estos sistemas son los que dan apoyo básico a la vida, y se auto mantienen.
- (ii) *Ambientes domesticados* o ecosistemas alimentados por la energía del sol, pero subsidiados por los humanos. Producen alimentos y fibras, y son apoyados por energía industrial.
- (iii) *Ambientes fabricados* o sistemas urbanos industriales alimentados por combustibles, básicamente de carácter fósil.

Usando esta distinción nos podemos dar cuenta de que los ambientes fabricados (entre los cuales se puede considerar al sistema económico) no se auto mantienen, y por tanto dependen del output de los otros dos tipos de sistemas.

El sistema económico puede verse como un sistema abierto unidireccional; un subsistema inmerso dentro de un sistema mayor que es el sistema natural Tierra, el cual puede aproximarse como un sistema cerrado (ver Figura 2).

Daly<sup>20</sup> (1991: 36) llamó a esta transformación de energía y materiales el “transflujo” (throughput en inglés), que sería el flujo físico entrópico de materia y energía desde las fuentes naturales, a través de la economía humana, y de retorno hacia los sumideros de la naturaleza. Esto es lo que Georgescu-Roegen había descrito como el “flujo metabólico” de la sociedad.

**Figura 2: El sistema económico como subsistema abierto unidireccional**



Como se puede ver en la Figura 2, el “proceso económico es sostenido por un flujo irreversible, unidireccional de energía y materiales con baja entropía desde el medio ambiente, que pasa a través del sistema económico, y regresa al medio natural en forma de energía no disponible y materiales de alta entropía” (Cleveland and Ruth, 1997: 205).

La energía solar da lugar a la producción de bienes y servicios naturales, mientras que la

<sup>20</sup> Siguiendo a Boulding, como él mismo dice.

energía industrial (electricidad o combustibles fósiles) ayuda al sistema económico a transformar materia en productos para el consumo. Al final del proceso, el consumo de estos productos representará la generación de residuos en la forma de energía y materia degradada (con alta entropía). De esta manera nos damos cuenta de cómo tanto los sistemas naturales como los domesticados están subsidiando al sistema económico, que es un sistema fabricado.

Es verdad, pero, que la Figura 2 podría completarse con una flecha que representase el reciclaje de materiales (por parte de los humanos o de la naturaleza), pero hemos de tener en cuenta que el reciclaje material nunca es completo al 100%, y que el reciclaje de la energía no es factible, que es lo que explica que al final el transflujo sea unidireccional (de baja a alta entropía). Es por esto que, usando estas ideas de la Segunda Ley de la termodinámica, hablamos de irreversibilidad. De hecho, tal y como dijo Daly (1996: 53), “no consumimos materia/energía, sino que consumimos (usamos de forma irrevocable) la capacidad de reorganizar la materia/energía”.

#### **6. 4. Sostenibilidad fuerte**

Para analizar la relación entre el sistema económico y la naturaleza, disponemos de diversos conceptos como la sostenibilidad débil y la sostenibilidad fuerte. Se entiende por sostenibilidad débil (Pearce and Atkinson, 1993) cuando mantenemos el bienestar de la población constante o creciente (entendido como riqueza o consumo material); esto se basa en la idea de que existe una completa capacidad de sustitución entre el capital fabricado por la humanidad y la naturaleza, y que ambos pueden ser valorados en términos monetarios. Por contra, la sostenibilidad fuerte (Noël and O'Connor, 1998) reconoce la existencia de una serie de bienes y servicios que nos proporciona la naturaleza (el llamado capital natural crítico) que es necesario para mantener y regular los sistemas, y que, por tanto, no puede ser sustituido por el capital fabricado (Barbier and Markandya, 1990). En lugar de ser sustitutivos, diríamos que son complementarios. Esto comporta que seguramente necesitaremos una serie de indicadores biofísicos que nos permitan conocer la calidad de los sistemas para hacer un diagnóstico más certero y promover políticas ambientales, evitando así el reduccionismo económico a la hora de tomar decisiones.

#### **7. Implicaciones normativas: “Orquestación de las ciencias” y Ciencia post-normal**

La economía ecológica también analiza los sistemas económicos y los problemas ambientales en el marco de la teoría de los sistemas complejos. Por tanto, a diferencia de la economía neoclásica, se centra, entre otras cosas, en la evolución de las economías, en el proceso de “llegar a ser”, en el cambio estructural, y en la aparición de la novedad (en la forma de cambio tecnológico, por ejemplo), todas ellas características mostradas por los sistemas complejos. La presencia de novedad, los mecanismos de retroalimentación entre los diferentes niveles de la jerarquía dentro del sistema, y su anticipación a los cambios, garantizan que siempre tendremos incertidumbre cuando analizamos a las economías como sistemas complejos. Esta es una de las razones para defender una nueva epistemología. De hecho, cuanto más investigación aplicamos, más incertidumbre generamos, pues aparecen nuevas preguntas y se encuentran nuevas relaciones entre las diferentes variables. En palabras de Faber y Proops cuando hablan de los problemas ambientales (1998: 110, mi traducción), “frecuentemente provocan la aparición de fenómenos impredecibles (novedad) (...) esto implica que la secuencia simple de problema → ciencia → técnica → solución no es necesariamente válida. Más

bien al contrario, podemos experimentar que nuestra mejora en el conocimiento puede incluso dificultar la búsqueda de soluciones”. Esto provoca que la existencia de lo impredecible sea relevante para la economía ecológica, y especialmente para la formulación de políticas.

No obstante, los nuevos problemas ambientales se caracterizan porque los hechos son inciertos, hay valores en disputa, lo que está en juego es mucho, y las decisiones necesarias son urgentes (Funtowicz y Ravetz 1991: 137). En este contexto, la economía ecológica defiende una nueva epistemología para tratar la complejidad. Así, en un contexto dominado por la incertidumbre y la ignorancia (no sabemos lo que no sabemos), necesitamos un nuevo enfoque para tratar estos problemas. Estas ideas han sido desarrolladas bajo diferentes perspectivas que son complementarias, y que incluso a veces se solapan, como es el enfoque “post-estructural” o “posmoderno” (Denzin 1994), la “ciencia cívica” (O’Riordan 1996), o la “ciencia post-normal” (Funtowicz y Ravetz 1991). Se dice que la economía ecológica es un ejemplo de ciencia post-normal (Funtowicz y Ravetz 1994).

Bajo este enfoque no se argumenta que no se pueda utilizar el conocimiento científico generado de la manera tradicional, sino que hay una serie de problemas emergentes caracterizados por la complejidad y la incertidumbre en los que la ciencia “normal” no puede utilizar los métodos tradicionales (como la secuencia mencionada antes de problema → ciencia → técnica → solución).

En ciencia post-normal se admite la imposibilidad de conseguir una realidad objetiva debido a las características inherentes cambiantes de los sistemas analizados, y debido al hecho de que toda investigación se ve afectada por los valores del investigador, por lo que no se puede hablar de una “ciencia libre de valores o neutral”. Con este trasfondo, la generación de políticas se vuelve un proceso multidimensional en el cual el investigador es solo una de las posibles fuentes de conocimiento, entre muchas otras (como el sentido común, las creencias, etc.), que tratan de influir en el resultado final.

En la ciencia post-normal, la investigación y la generación de conocimiento no se llevan a cabo con la finalidad de proveer a quien toma las decisiones de una solución al problema, para evitarle así que sea él o ella quién tome la decisión, y legitimar sus actos. Por el contrario, la idea es crear un entendimiento contextual sobre el tema de tal forma que mantengamos informados a todos los actores involucrados en el proceso de toma de decisiones, pero dejando que sean ellos quienes lleguen a una solución satisfactoria de compromiso. Esta solución de compromiso no tiene por objeto ser un reflejo de la “verdad”, sino una visión de la realidad construida socialmente (Clark et al. 1995: 118), un entendimiento consensuado tanto del problema como de las formas de afrontarlo.

Como dicen Kay et al. (1999: 737, mi traducción), “el programa de la ciencia post-normal consiste en proveer de una base de entendimiento necesaria para desentrañar la complejidad (aparición de novedad, la irreducible incertidumbre, la causalidad interna). De tal forma que podamos anticipar satisfactoriamente cuando eso sea posible, y adaptarnos, cuando sea apropiado o necesario, a los cambios en los sistemas auto-organizados de los que somos una parte integrada y dependiente”.

En ciencia post-normal, por tanto, se asume que tanto en la ciencia como en el proceso de toma de decisiones hay juicios de valor, es por eso que tenemos que garantizar la calidad del proceso de toma de decisiones, en lugar del resultado final, dado que no existe una verdad objetiva (Funtowicz y Ravetz 1994: 200). Por eso, retomando las ideas de Simon (1983), deberíamos pasar de una racionalidad orientada al resultado final o sustantiva a otra racionalidad procedimental, en la que el hecho relevante sea la calidad del proceso de generación del conocimiento en lugar del resultado final. Esta racionalidad procedimental implicaría una extensión de la comunidad de evaluadores de las decisiones a individuos de otras disciplinas y a aquellas personas afectadas por la decisión. El trabajo del científico consistiría, por tanto, en asumir y tratar de gestionar la incertidumbre que caracteriza cada campo para obtener información de la más alta calidad posible (Funtowicz y Ravetz 1994: 200).

Así, tanto la complejidad del sistema analizado, como el subjetivismo inherente en su descripción y entendimiento, nos hace defender la necesidad de utilizar descripciones paralelas no-equivalentes de nuestro sistema para ganar en robustez. Esto se puede hacer utilizando las ideas de otras disciplinas, el sentido común, o incluso las historias populares. Esto es lo que se conoce como pluralismo metodológico (Norgaard, 1989), o 'consilience' (Wilson, 1998). Los dos conceptos, sin embargo, no son más que la aplicación de la idea de Otto Neurath (1944) de la unidad dialéctica o la orquestación de las ciencias (tal y como cita Martínez-Alier, 1987: 207), y forma parte de la base del concepto de ciencia post-normal, que también incluye conocimiento popular, no tenido en cuenta por Neurath. Es por eso que la bioeconomía (como la llamaba Georgescu-Roegen) o la economía ecológica, como ciencia post-normal que es, defiende el uso de diferentes disciplinas en nuestro análisis.

## **Conclusión**

Resumiendo los argumentos presentados en este capítulo, se ha mostrado una evolución del pensamiento ambiental en la ciencia económica, y como éste ha cambiado a lo largo del tiempo. Para los fisiócratas el interés estaba en el proceso económico, que por definición es biofísico, histórico, y evolutivo. Los economistas clásicos cambiaron hacia un interés en la escasez. El reconocimiento de la escasez puede interpretarse como un interés en definir los límites del crecimiento económico. Esto, sin embargo, no se mantuvo con los economistas neoclásicos, que se centraron en el intercambio y el equilibrio de la economía, en lugar de la producción. Es por eso que desarrollaron una serie de herramientas basadas en la mecánica clásica. Más tarde, los economistas de los recursos naturales, con esas mismas herramientas, se centraron de nuevo en la escasez y mencionaron el problema de los residuos. No obstante, su respuesta fue en la forma de "asignaciones óptimas" de recursos en el primer caso, y de definición de "derechos de propiedad" en el segundo caso. Estas soluciones, a pesar de ser de utilidad en muchos casos, están muy lejos de ser una panacea cuando nos enfrentamos a los problemas ambientales complejos.

Cuando analizamos la relación entre la economía y el medio ambiente, la teoría termodinámica nos ofrece argumentos muy útiles. A pesar de eso, tenemos que tener cuidado del uso que hagamos, pues los conceptos de la termodinámica tiene que ser aplicados solo en los sistemas apropiados.

De la Primera Ley se deriva que en todo proceso todos los inputs se convierten, finalmente, en outputs. La Segunda Ley, no obstante, tiene más implicaciones. Nos

proporciona limitaciones a la eficiencia de los procesos (por ejemplo el perfecto reciclaje es imposible), y debido a la irreversibilidad de la degradación de la energía (desde energía disponible a no disponible), define lo que se conoce como la Flecha del Tiempo en la evolución del sistema, en la forma de un aumento de la generación de entropía. No obstante el concepto de entropía no debería considerarse como una herramienta de análisis, sino como una base para un mejor entendimiento de la relación entre economía y medio ambiente, que nos apunta la necesidad de tener en cuenta la historia cuando llevamos a cabo nuestro análisis.

De la termodinámica llegamos a la conclusión que la mayor restricción impuesta por el medio ambiente es la de hacer compatible la escala temporal humana con la escala temporal ecológica, de tal forma que podamos garantizar la sostenibilidad sin perturbar los procesos ecológicos que dan apoyo a la vida en la Tierra.

Por su parte también se ha presentado la economía ecológica, que se trata de una multidisciplina que restituye el interés del análisis económico en el aprovisionamiento material del “oikos” o de la “polis”. Es decir, se interesa en los fundamentos biofísicos del proceso económico. Al hacer esta aproximación, utiliza conceptos y herramientas desarrolladas por analistas energéticos como Podolinsky, Lotka, y Odum.

La economía ecológica ve el sistema económico como un subsistema abierto, que se encuentra dentro del sistema natural Tierra, que es cerrado. Aquí, el proceso económico se ve como unidireccional y sostenido por un flujo continuo de energía y materiales de baja entropía, que finalmente volverán al medio ambiente degradados en la forma de calor y materiales de rechazo. Este hecho impone algunas limitaciones al crecimiento físico del subsistema, tal y como se ha mencionado para el caso de la escala.

Por último, se ha mantenido que en este contexto de complejidad e incertidumbre se necesita una nueva epistemología para analizar la relación entre el sistema económico y el medio ambiente, y que ésta era la ciencia post-normal, junto con una orquestación de las ciencias.

## **Referencias**

Ayres, R.U. (1998) “Eco-thermodynamics: economics and the second law”, *Ecological Economics*, 26: 189-209.

Barbier, E.B., and Markandya, A. (1990) “The conditions for achieving environmentally sustainable growth”, *European Economic Review*, 34: 659-669.

Barnett, H.J., and Morse, C. (1963) *Scarcity and Growth: The Economics of Natural Resource Availability*. John Hopkins, Baltimore.

Binswanger, M. (1993) “From microscopic to macroscopic theories: entropic aspects of ecological and economic processes”, *Ecological Economics*, 8: 209-234.

Buenstorf, G. (2000) “Self-organization and sustainability: energetics of evolution and implications for ecological economics”, *Ecological Economics*, 33: 119-134.

Christensen, P.P. (1989) “Historical roots for ecological economics – biophysical versus allocative approaches”, *Ecological Economics*, 1: 17-36.

- Clausius, R. (1865) *Abhandlungen über die Mechanische Wärmetheorie*. F. Vieweg, Braunschweig.
- Cleveland, C.J. (1987) “Biophysical economics: historical perspective and current research trend”, *Ecological Modelling*, 38: 47-73.
- Cleveland, C.J., and Ruth, M. (1997) “When, where, and by how much do biophysical limits constraint the economic process: A survey of Nicholas Georgescu-Roegen’s contribution to ecological economics”, *Ecological Economics*, 22: 203-224.
- Cleveland, C.J., Costanza, R., Hall, C.A.S., and Kaufmann, R. (1984) “Energy and the U.S. economy: a biophysical perspective”, *Science*, 225: 890-897.
- Costanza, R. (1989) “What is ecological economics?”, *Ecological Economics*, 1: 1-7.
- Costanza, R. (ed.)(1991) *Ecological Economics: The Science and Management of Sustainability*. Columbia University Press, New York.
- Daly, H.E. (1990) “Toward some operational principles of sustainable development”, *Ecological Economics* 2:1-6.
- Daly, H.E. (1991) *Steady State Economics: Second Edition with New Essays*. Island Press, Washington DC.
- Daly, H.E. (1992) *Steady-State Economics*. Earthscan Publications, London.
- Daly, H.E. (1996) “Consumption: value added, physical transformation and welfare”, in Costanza, R., Segura, O., and Martinez-Alier, J. (eds.): *Getting Down to Earth*. Island Press, Washington DC.
- de Bruyn, S.M. (1999) “The need to change attractors”, *Ökologisches Wirtschaften*, 3: 15-17.
- de Bruyn, S.M., and Opschoor, J.B. (1997) “Developments in the throughput-income relationship: theoretical and empirical observations”, *Ecological Economics*, 20: 255-268.
- Denzen, N. (1994) “The art and politics of interpretation”, in Denzen, N., and Lincoln, Y. (Eds.): *Handbook of Qualitative Research*. Sage Publications, London.
- Duchin, F. (1988) “Analyzing structural change in the economy”, in Ciaschini, M. (ed.): *Input-Output Analysis: Current Developments*. Chapman and Hall, London.
- Duchin, F. (1996) “Ecological economics: the second stage”, in Costanza, R., Segura, O., and Martinez-Alier, J. (eds.): *Getting Down to Earth*. Island Press, Washington DC.
- Duchin, F., and Lange, G. (1994) *The Future of the Environment: Ecological Economics and Technological Change*. Oxford University Press, New York.
- Duchin, F., and Szyld, D. (1985) “A dynamic input-output model with assured positive output”, *Metroeconomica* 37: 269-282.

- Faber, M. (1985) "A biophysical approach to the economy entropy, environment and resources", in van Gool, W., and Bruggink, J. (eds.): *Energy and Time in Economic and Physical Sciences*. North-Holland, Amsterdam.
- Faber, M., and Proops, J.L.R. (1998) *Evolution, Time, Production and the Environment*. Springer, Berlin.
- Faber, M., Manstetten, R., and Proops, J.L.R. (1996) *Ecological Economics: Concepts and Methods*. Edward Elgar, Cheltenham.
- Funtowicz, S.O., and Ravetz, J.R. (1991) "A new scientific methodology for global environmental issues", in Costanza, R. (ed.): *Ecological Economics: The Science and Management of Sustainability*. Columbia University Press, New York.
- Funtowicz, S.O., and Ravetz, J.R. (1994) "The worth of a songbird: Ecological economics as a post-normal science", *Ecological Economics*, 10: 197-207.
- Georgescu-Roegen, N. (1971) *The Entropy Law and the Economic Process*. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts.
- Georgescu-Roegen, N. (1975) "Energy and economic myths", *Southern Economic Journal*, 41:347-381.
- Giampietro, M. (1997) "Linking technology, natural resources, and the socioeconomic structure of human society: a theoretical model", *Advances in Human Ecology*, vol. 6: 75-130.
- Giampietro, M., Mayumi, K., and Bukkens, S.G.F. (2001) "Multiple-Scale Integrated Assessment of Societal Metabolism: An Innovative Approach to Development and Sustainability", mimeo.
- Gowdy, J.M. (1994) *Coevolutionary Economics: The Economy, Society, and the Environment*. Kluwer Academic Publishers, Amsterdam.
- Gray, L.C. (1913) "The economic possibilities of conservation", *Quarterly Journal of Economics*, 27: 497-519.
- Gray, L.C. (1914) "Rent under the presumption of exhaustibility", *Quarterly Journal of Economics*, 28: 466-489.
- Hall, C.A.S., Cleveland, C.J., and Kaufmann, R.K. (1986) *The Ecology of the Economic Process: Energy and Resource Quality*. John Wiley & Sons, New York.
- Herring, H. (1999) "Does energy efficiency save energy? The debate and its consequences", *Applied Energy*, 63: 209-226.
- Hotelling, H.C. (1931) "The economics of exhaustible resources", *The Journal of Political Economy*, 39: 137-175.
- Jevons, F. (1990) "Greenhouse: A paradox", *Search*, 21 (5)



- Jevons, W.S. (1865) *The Coal Question; An Inquiry Concerning the Progress of the Nation, and the Probable Exhaustion of Our Coal-Mines*. Macmillan, London.
- Kay, J.J., Regier, A.H., Boyle, M., and Francis, G. (1999) "An ecosystem approach for sustainability: addressing the challenge for complexity", *Futures* 31: 721-742.
- Kuhn, T.S. (1962) *The Structure of Scientific Revolutions*, Chicago University Press, Chicago.
- Lotka, A.J. (1922) "Contribution to the energetics of evolution". *Proc. Nat. Acad. Sci.* 8: 147-154.
- Lotka, A.J. (1956) *Elements of Mathematical Biology*. Dover Publications, New York.
- Malenbaum, W. (1978) *World Demand for Raw Materials in 1985 and 2000*. McGraw-Hill, New York.
- Malthus, T.R. (1778) *An Essay on Population*. Ward, Lock and Company, London.
- Marshall, A. (1920) *Principles of Economics*. Macmillan, London.
- Martinez-Alier, J. (1987) *Ecological Economics: Energy, Environment, and Society*. Blackwell's Book Services, Oxford.
- Martínez-Alier, J. and Roca Jusmet, J. (2000) *Economía ecológica y política ambiental*, PNUD, Mexico.
- Meadows, D.H., Meadows, D.L., Randers, J., and Behrens, W.W. (1972) *The Limits to Growth*. PAN Books Ltd., London and Sydney.
- Mill, J.S. (1866) *Principles of Political Economy*, Longman-Green, London.
- Mirowski, P. (1989) *More Heat Than Light*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Neurath, O. (1944) *Foundations of the Social Sciences*. University of Chicago Press, Chicago.
- Noël, J.F., and O'Connor, M. (1998) "Strong Sustainability and Critical Natural Capital", in Faucheux, S., and O'Connor, M. (eds.) *Valuation for Sustainable Development. Methods and Policy Indicators*. Edward Elgar, Cheltenham.
- Norgaard, R.B. (1989) "The case for methodological pluralism", *Ecological Economics*, 1: 37-57.
- Norgaard, R.B. (1994) *Development Betrayed*. Routledge, London.
- O'Connor, M. (1991) "Entropy, structure, and organisational change", *Ecological Economics*, 3: 95-122.
- O'Riordan, T. (1996) "Democracy and the sustainable transition", in Lafferty, W.M., and Meadowcroft, J. (eds.): *Democracy and the Environment. Problems and Prospects*. Edward Elgar, Cheltenham.

Odum, E.P. (1989) *Ecology and Our Endangered Life-Support Systems*. Sinuauer associates, Sunderland, Massachusetts.

Odum, H.T. (1971) *Environment, Power, and Society*. John Wiley & Sons, New York.

Odum, H.T., and Pinkerton, R.C. (1955) "Time's speed regulator: the optimum efficiency for maximum power output in the physical and biological systems", *American Scientist* 43: 331-343.

Pearce, D., and Atkinson, G.D. (1993) "Capital theory and the measurement of weak sustainable development: and indicator of 'weak' sustainability", *Ecological Economics*, 8: 103-108.

Pearce, D., and Turner, K. (1990) *Economics of Natural Resources and the Environment*. Harvester Wheatsheaf, Great Britain.

Pearce, D., and Turner, K. (1990) *Economics of Natural Resources and the Environment*. Harvester Wheatsheaf, Great Britain.

Proops, J.L.R. (1979) *Energy, Entropy and Economic Structure*. PhD Thesis, Keele University.

Proops, J.L.R., Faber, M., and Wagenhals, G. (1993) *Reducing CO<sub>2</sub> Emissions. A Comparative Input-Output Study for Germany and the UK*. Springer-Verlag, Berlin.

Quesnay, F. (1758) "Tableau Economique", in Kuczynski, M., and Meek, R.L. (1972)(eds.): *Quesnay's Tableau Economique*. Macmillan, London.

Ramos-Martin, J. (2001): "Historical analysis of energy intensity of Spain: from a "conventional view" to an "integrated assessment", *Population and Environment*, 22: 281-313.

Robbins, L. (1932): *An Essay on the Nature and Significance of Economic Science*. Macmillan, London.

Ruth, M. (1993) *Integrating Economics, Ecology and Thermodynamics*. Kluwer, Dordrecht.

Scott, A. (1985) *Progress in Natural Resource Economics*. Clarendon Press, Oxford.

Simon, H.A. (1983) *Reason in Human Affairs*. Stanford University Press, Stanford.

Von Weizsacker, E.U., Lovins, A.B., and Lovins, L.H. (1997) *Factor Four. Doubling Wealth, Halving Resource Use*. Earthscan, London.

Wilson, E.O. (1998) *Consilience*. Alfred Knopf, New York.