

La síntesis emergética: una valoración de los servicios de los ecosistemas con base termodinámica

P.L. Lomas¹, M. Di Donato², S. Ulgiati³

(1) Dpto. Interuniversitario de Ecología, Sección Universidad Autónoma de Madrid, c/Darwin, 2. 28045 Madrid

(2) CIP-Ecosocial. C/ Duque de Sesto, 40. 28009 Madrid

(3) Dpto. de Ciencias Ambientales, Universidad de Nápoles "Parthenope", Via Acton, 8. 80133 Nápoles, Italia

La Síntesis Emergética: Una valoración de los servicios de los ecosistemas con base termodinámica. El cambio global ha abierto un intenso debate sobre el papel y el valor de los servicios de los ecosistemas entre la reducción a lo monetario, propuesta por las corrientes Neo-clásicas de la Economía a través de la Economía Ambiental, y la ampliación a lo físico y lo social, a través de la Economía Ecológica, en una aproximación multi-criterio. Dentro de esta última corriente se sitúa la Síntesis Emergética. Se trata de un método de valoración de los servicios de los ecosistemas con bases termodinámicas que pretende valorar aspectos físicos del proceso económico con el objetivo de ofrecer herramientas a la toma de decisiones. El método gira en torno a la denominada memoria energética o emergía, una medida en unidades comunes de los flujos de materia, energía, dinero, información, etc. que contribuyen a generar un producto o sistema. Para ello se desarrollan los conceptos de calidad de la energía, jerarquía de energías y transformicidad, así como el principio de máxima potencia emergética, que sirve para escoger entre diversas configuraciones, de acuerdo con criterios de carácter socio-político.

Palabras clave: memoria energética; emergía; transformicidad; valoración multi-criterio; Economía Ecológica.

Emergy Synthesis: Ecosystem services valuation with thermodynamic basis. A debate on the ecosystem services' role in social-economic systems has started due to the environmental global change. On one hand, neo-classical mainstream Economics attempts to reduce environmental dimension to a monetary approach in the Environmental Economics; on the other hand, Ecological Economics, tries to include physical and social criteria in Economics, within a multi-criteria approach. Emergy Synthesis is included within the latter approach as an ecosystem valuation method with thermodynamic basis, which is devoted to value some physical aspects of the economic process in support to policy decision making. The main concept of the method is energy memory or emergy, a measure - in common units of embodied solar energy - of the matter, energy, money, and information flows which contribute to a specific service, functioning or product. With this aim, energy quality, energy hierarchy, and transformity concepts are developed, within the framework of the maximum empower principle, used to choose among different system configurations, in accordance with socio-political criteria.

Key words: energy memory; emergy; transformity; multi-criteria assessment; Ecological Economics.

La problemática de la valoración: desde lo monetario a lo termodinámico, superando el reduccionismo monocriterial

El debate sobre qué dimensión confiere valor a las cosas es uno de los grandes temas de la historia del pensamiento económico. La dimensión ecológica del mismo es, sin embargo, mucho más reciente. No fue hasta finales de los 90 que la aparición de un artículo en la revista norteamericana *Nature* (Costanza *et al.*, 1997), inicia el debate sobre la estimación cuantitativa del peso que algunos servicios de los ecosistemas tienen para la sociedad, debate que ha durado hasta hoy. Más allá de las cifras, este trabajo pone en evidencia que el paradigma económico dominante (aislado, mecanicista, estático y ahistórico), articulado alrededor de un flujo circular entre consumidores y productores, bajo una racionalidad constante en el tiempo y el espacio, ignora los principios físicos fundamentales, planteando la necesidad de un cambio de paradigma para abordar el reto de los servicios de los ecosistemas. Frente a este debate, dos han sido las principales aproximaciones desarrolladas: de una parte, la Economía Ambiental y, de la otra, la Economía Ecológica.

Bajo la primera, la Economía Neo-clásica trata de ampliar a las “externalidades” del sistema económico el marco de análisis crematístico ligado a los mecanismos de mercado, con la intención de calcular el así denominado “Valor Económico Total”. Así, se produce la paradoja de que, en lugar de ampliar realmente el campo de lo económico más allá de lo monetario, se reduce también el campo de lo ambiental a lo puramente crematístico, bajo una lógica maximizadora y monetarista.

Por otra parte, desde la aparición de la termodinámica, esa “física del valor económico”, en palabras del economista rumano Nicholas Georgescu-Roegen (1975), muchos investigadores han llamado la atención acerca de las implicaciones que sus leyes tenían sobre los conceptos de coste y valor. Fue el mismo Georgescu-Roegen uno de los que seguramente mejor sintetizó las mismas, analizando el papel de la segunda ley de la termodinámica en un mundo finito y cerrado en materiales (Georgescu-Roegen, 1975; Carpintero, 2006). Fueron sus ideas y las de otros economistas heterodoxos, así como las de científicos provenientes de la ecología, la física, etc., las que, al hilo de la gestión de los sistemas hombre-naturaleza como sistemas complejos, reemprendieron el debate sobre el valor, en un marco multi-criterial sometido a las restricciones del mundo físico, superando las intenciones optimizadoras del monovalor monetario. Este conjunto de ideas son algunas de las bases teóricas de la Economía Ecológica (Martínez-Alier, 1987; Ropke, 2004).

En un marco multi-criterio que integra tanto el capital económico como el natural, este artículo expone algunas de las principales contribuciones al debate sobre la valoración de servicios de los ecosistemas que, desde la Ecología, se han llevado a cabo a partir de los trabajos del científico norteamericano Howard T. Odum (1924-2002) con su concepto de emergía (escrito con “m”), y la denominada Síntesis Emergética (Odum, 1996), una valoración económico-ecológica con bases termodinámicas de sistemas territoriales y productivos (Di Donato, 2005).

Aspectos metodológicos y conceptuales

En este apartado se explican brevemente algunos de los principales conceptos ligados al marco emergético, si bien para una mayor profundización de los mismos en castellano se recomienda consultar el documento de trabajo de Álvarez *et al.* (2006).

Memoria Energética o Emergía

Hablar de emergía implica aclarar dos conceptos. Por una parte, el concepto de calidad de energía, y por otra, el de transformicidad.

Siguiendo los principios teóricos de la ecología y la energética de sistemas, H.T. Odum observaba que en procesos de auto-organización de sistemas complejos, la segunda ley de la termodinámica implica que la energía que pasa de un nivel a otro del sistema es menor en cada escalón; pero, la energía necesaria para la construcción de niveles más altos de la auto-organización es cada vez mayor conforme el sistema se hace más complejo. Es decir, la energía se concentra conforme se avanza en niveles de auto-organización y complejidad (**Fig. 1**).

Esta observación implica que 1 julio de energía solar, 1 julio de carbón o 1 julio de electricidad aunque representan la misma cantidad, no representan la misma **calidad de energía**, en el sentido del potencial que tienen para actuar sobre el sistema, y en la necesidad que el sistema tiene de aportar mayores o menores cantidades de energía menos concentrada para generar cada una de ellas. La conclusión obvia es que existe una **jerarquía de energías** según su calidad (**Fig. 1**).

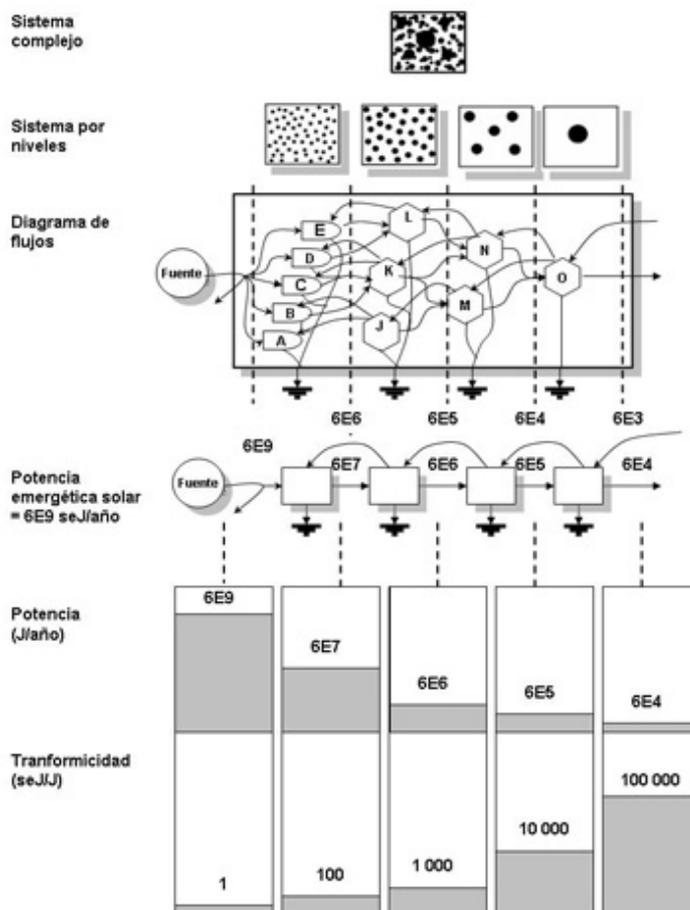


Figura 1. Conceptos de calidad y jerarquía de energías. Se observa en la figura cómo a partir de la complejidad original del sistema se puede elaborar un diagrama de flujos del que extraer la información correspondiente a potencia energética, potencia emergética y transformicidad. Se puede ver cómo la transformicidad aumenta conforme se avanza en niveles de complejidad, a la inversa que la energía transmitida, lo que permite usar a la primera como un indicador de la calidad de la energía (Fuente: a partir de Brown y Ulgiati, 2004a)

Así, y con el objetivo de tener en cuenta los distintos tipos de energía que guían los procesos físicos, y en último término, la Economía, Odum comenzó a usar el término energía incorporada para denominar a la cantidad de energía de un tipo necesaria para generar otra más concentrada. Posteriormente, y a sugerencia de David Scienceman, la definió como **energía**, o cantidad de energía útil (exergía) poco concentrada necesaria para generar una cantidad de energía más concentrada (Odum, 1988; 1996), con el objetivo de distinguirla del concepto anterior, que ya estaba siendo empleado con otro significado, y de diferenciarla de éste en su aspecto de memoria energética (Brown y Ulgiati, 2004a).

La elección de la energía solar como referencia se explica dado que supone la principal entrada de energía poco concentrada a la ecosfera. Así, la **energía solar** sería la cantidad de energía de calidad igual a la del sol que se necesitaría para generar un determinado producto. Por tanto, las unidades de la energía serían los julios equivalentes solares (seJ). Notesé que no se habla de una cantidad de energía de origen solar, sino de una cantidad de energía (cualquiera que sea su origen) con calidad referida a la de la energía solar.

Para poder transformar las diferentes calidades de energía o materia a la calidad de energía solar correspondiente (o energía), se usaría un factor de equivalencia, la **transformicidad** o la **energía específica**, respectivamente, que informan de qué cantidad de energía con calidad equivalente a la solar es necesaria para generar una unidad de energía o materia de mayor calidad (Odum, 1988). Por tanto, la transformicidad tendría unidades de seJ/unidad de energía, y la energía específica de seJ/unidad de masa.

Así, en el álgebra emergético:

$$E_m = T_r * E_x$$

E_m = emergía (seJ),

T_r = Transformicidad (seJ/unidad),

E_x = Exergía o masa (unidad).

Por otra parte, si se toma una referencia temporal, se suele emplear el concepto de **potencia emergética**, es decir, el flujo de emergía por unidad de tiempo (seJ/unidad de tiempo), y así:

$$P_x = \frac{dE_m}{dt}$$

Utilizando este último concepto, Odum tomó las ideas de A.J. Lotka (1922a; 1922b) ligadas a la importancia de la energía en el proceso evolutivo (el denominado Principio de Máxima Potencia), y las transformó para dar lugar al **Principio de Máxima Potencia Emergética** (Odum, 1996; Odum, 2001; Cai *et al.*, 2004; Hall, 2004), que establece que, en la competición entre procesos auto-organizativos prevalecen las relaciones y diseños que maximizan la captura y el uso de la potencia emergética.

El significado físico de estos conceptos de emergía y transformicidad, así como la validez del principio de máxima potencia emergética, son todavía hoy algunos de los principales temas de investigación, crítica y discusión del método (Hau y Bakshi, 2004). En este sentido, desde la física se atribuye a la emergía esa capacidad dinámica de la que carecen otros indicadores, ya que en su cálculo encierra la historia, en términos de aportación de materia o energía con calidad solar, del producto generado. La transformicidad sería ese factor que permite corregir las medidas de intensidad estáticas de materia y energía por un factor histórico. Por otra parte, el principio de máxima potencia emergética aporta un criterio que permite determinar qué sistemas o diseños, ya sean ecológicos o económicos, tienen más probabilidades de sobrevivir en el tiempo frente a otros, convirtiéndose así en uno de los fundamentos de la Síntesis Emergética (Odum, 1996; Odum, 2001).

La Síntesis Emergética y sus aportaciones a la valoración de los servicios de los ecosistemas

La Síntesis Emergética es una metodología ecológico-termodinámica de valoración ambiental basada en la conversión a unidades comunes de los flujos de energía, masa y dinero (Odum, 1996) utilizados en un sistema socio-ecológico. El objetivo de esta metodología es estudiar la organización de sistemas termodinámicamente abiertos, es decir, que intercambian materia y energía con su ambiente (Franzese *et al.*, 2003), a través del uso de una perspectiva sistémica y energética. Algunos de los principales objetivos de su aplicación son: la caracterización de las principales fuentes de energía externas al sistema y que dirigen su evolución; la estimación de la contribución de los servicios de los ecosistemas al sistema socio-económico, como capital natural; la estimación del trabajo de la ecosfera en la dinámica global de los sistemas antrópicos; la realización de una contabilidad ambiental económico-ecológica integrada sobre bases termodinámicas, con el objetivo de servir a la toma de decisiones políticas; y el cálculo de indicadores termodinámicos de rendimiento, impacto, y sostenibilidad, etc.

Las principales fases que caracterizan una síntesis emergética se pueden resumir (a partir de Brown y Ulgiati, 2004b) en:

1. Definición de los límites espacio-temporales del sistema investigado.
2. Modelado del sistema. Consiste en la representación, a través de diagramas de flujos de materia y energía, utilizando la simbología energética (Odum, 1994), de la interacción entre las fuentes externas e internas del sistema, y los sistemas productivos naturales y antrópicos, así como los flujos de salida del sistema y la retroalimentación del mismo. Como ejemplo, en la **Figura 2** se observa el modelo que Lomas *et al.* (en prensa) realizaron del funcionamiento del socio-ecosistema España.
3. A efectos de simplificar la contabilidad, los modelos complejos se suelen resumir para capturar las principales entradas y salidas al sistema, así como otros flujos que explican, en gran medida, el funcionamiento interno del mismo (**Fig. 3**).

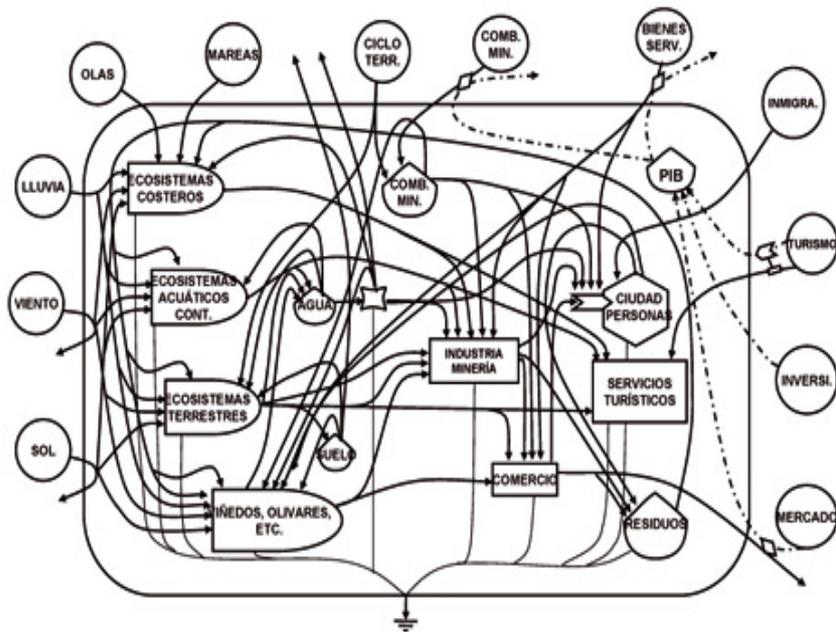


Figura 2. Ejemplo de diagrama de flujos para el socio-ecosistema España.

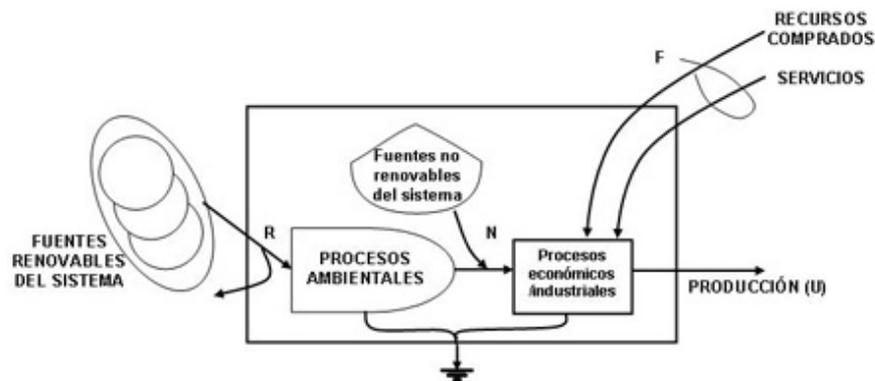


Figura 3. Ejemplo de diagrama de tres brazos genérico. Se hacen constar los principales flujos del sistema: R, flujo de energía renovable; N, flujo de energía no renovable local; F, importación de bienes y servicios; U= Coste de la producción del sistema.

- Balances del sistema. Implica la construcción de una tabla con los principales flujos de energía clasificados, tal y como se presenta a continuación en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Principales campos de los que consta una tabla de síntesis energética.
Fuente: Basado en Brown and Ulgiati (2004b).

Nota	Item	Dato	Unidad	Transformicidad (seJ/unidad)	Energía solar (seJ/año)	Valor macroeconómico (em\$/año)
1	Item1	xx.x	J/año	xxx.x	Em_1	Em_1/EMR
2	Item2	xx.x	g/año	xxx.x	Em_2	Em_2/EMR
...
...
n.	Ene-simo Item	xx.x	J/año	xxx.x	Em_n	Em_n/EMR
y	Producto	xx.x	J ó g/año	$\frac{\sum_n^1 Em_i}{xx.x}$	$\sum_n^1 Em_i$	$EMR = \frac{\sum_n^1 Em_i}{PIB}$
y	Producto	xx.x	J ó g/año	$\frac{\sum_n^1 Em_i}{xx.x}$	$\sum_n^1 Em_i$	$EMR = \frac{\sum_n^1 Em_i}{PIB}$

La Columna 1 “nota” se refiere al orden en que cada uno de los flujos está colocado, así como al orden de la nota a pie de tabla en la que se refiere el origen del dato, y los cálculos realizados para su transformación a las unidades correspondientes. La Columna 2 se refiere al nombre del flujo evaluado. La Columna 3 es la cifra proporcionada por los cálculos elaborados para cada flujo, que figuran numerados al pie de la tabla, en sus unidades correspondientes, que se encuentran en la Columna 4. La Columna 5 se refiere a la energía por unidad (transformicidad o energía específica), que transforma las cifras de la columna 3, en las cifras de la Columna 6, que ya son referidas a energía solar. Por último, la Columna 7 se refiere al denominado valor macroeconómico, o cantidad de actividad económica que se mueve debido a un determinado flujo o reserva de energía, y que se calcula dividiendo su energía por la cantidad de actividad económica media movida por el total de energía del sistema o relación energía-dinero. Las últimas filas se reservan para los productos del sistema (exportaciones, población, productos monetarios, etc.), y los cálculos relativos a su transformicidad, energía total, etc.

5. Cálculo de una serie de indicadores emergéticos. A partir de los datos de la tabla anterior, se pueden calcular toda una serie de relaciones. A continuación se da una lista de algunos de los principales indicadores tradicionalmente usados (**Tabla 2**).

Tabla 2. Algunos de los principales indicadores de la síntesis emergética. Las letras que figuran en la fórmula se refieren a la figura 3 (tomado de Álvarez et al. 2006).

Índice	Fórmula	Unidades	Descripción
Flujo de Energía renovable local (Local renewable energy flow)	R	seJ/año	Entrada de Energía renovable al sistema
Flujo de Energía no renovable local (Local non-renewable flow)	N	seJ/año	Entrada de Energía no renovable al sistema desde fuentes internas al mismo
Flujo de Energía importado (Flow of imported energy)	F	seJ/año	Entrada de Energía desde fuentes externas (generalmente con un intercambio monetario)
Coste energético de producción	$U = R + N + F$	seJ/año	Coste en energía de la producción del sistema
Fracción renovable de la energía usada	R/U	-	Fracción renovable de la Energía empleada
Índice de apropiación y explotación de Energía (Energy yield ratio; EYR)	$1 + I/EIR$	-	Mide la contribución potencial de un proceso al conjunto del sistema debida a la explotación de recursos locales
Índice de inversión en Energía (Energy investment ratio; EIR)	$F/(R+N)$	-	Relación fuentes externas al sistema y fuentes internas al mismo. Mide la eficacia en el uso de la energía invertida en un proceso.
Índice de carga ambiental (Environmental loading ratio; ELR)	$(F+N)/R$	-	Índice de estrés ambiental debido a una producción. Indicador de la presión de un proceso de transformación sobre el medio ambiente
Índice de energía renovable capturada (Renewable energy captured)	R/F	-	Índice de efectividad del sistema socioeconómico en la captación de los flujos naturales.
Consumo de Energía por persona (Energy per capita)	$U/\text{población}$	seJ/persona/año	Medida del nivel de vida potencial medio de una población
Densidad de potencia Energética (Empower density)	$U/\text{superficie del país}$	seJ/m ² /año	Índice de presión de un proceso sobre el territorio
Capacidad de carga renovable al nivel de vida actual (Renewable carrying capacity in the present lifestyle)	$(R/U) * \text{población}$	Población	Estima de la población que podría mantenerse dependiendo sólo de los recursos renovables con el estilo de vida actual.
Índice monetario Energético (Energy to money ratio; EMR)	U/PIB	seJ/\$	Relación Energía con unidades monetarias. Análisis de relaciones comerciales.
Índice de sostenibilidad (Energy sustainability index; ESI)	EYR/ELR	-	Medida de la contribución del sistema jerárquicamente superior a la producción del sistema por unidad de carga del mismo

6. Comparación espacio-temporal de los indicadores energéticos del sistema con otros sistemas similares y/o el mismo.

Un ejemplo de la aplicación de estos conceptos para el contexto español se puede consultar en el artículo Lomas *et al.* (en prensa), donde se hace una síntesis energética del socio-ecosistema España para los años 1984-1989-1994-2000 y 2002. En sus conclusiones se puede observar, a través de diversos indicadores energéticos, cómo el nivel medio de vida de los españoles, en términos de la explotación de los servicios de los ecosistemas por parte de la economía, estaba todavía ligado a la media de los países de cultura mediterránea hasta la primera mitad de los años 80, y posteriormente adopta modos de uso de los servicios de los ecosistemas propios de Europa occidental, con una alta dependencia exterior en materias primas, una creciente ineficiencia de la economía, y una fuerte desigualdad comercial con los países de los que se importan las materias primas, entre otras conclusiones concernientes a la eficacia de la herramienta "áreas protegidas" como fuerte apuesta para alcanzar la sostenibilidad en el país.

La Síntesis energética en un marco multi-criterio de valoración de servicios de los ecosistemas

Desde los años 70, H.T. Odum ya intuye que es necesario formalizar una aproximación que permita incluir las aportaciones de los ecosistemas al sistema socio-económico, es decir, valorar los servicios de los ecosistemas, que el mercado no capturaba en su monovalor monetario. En esta dirección se dirigen los esfuerzos realizados a través de la Síntesis energética que, como la misma palabra dice, es una síntesis de información de diverso tipo dentro de un mismo marco de valoración.

A lo largo de su trayectoria, el científico norteamericano mantuvo diversos debates en relación con la cuestión del valor, el significado de la emergencia dentro del desafío de encontrar una teoría del valor de tipo energético, etc. No hay duda alguna de las aportaciones científicas del método y de los indicadores que del mismo se derivan. Sin embargo, es de señalar, en respuesta a estas polémicas que se han derivado de los intentos por construir una teoría energética del valor (Georgescu-Roegen, 1979; 1983; Costanza, 2004), que el uso de la emergencia no excluye la necesidad de disponer de otros indicadores de tipo físico (MFA, LCA, Exergía, Energía Incorporada, etc.) o monetario, que proporcionan una información diferente de ésta.

De hecho, actualmente se están realizando llamamientos y propuestas para aprovechar las potencialidades del método dentro de una perspectiva multi-criterio, que permitirían superar la tradicional aproximación monetaria, como es el caso de SUMMA (Ulgiati *et al.*, 2006), u otras propuestas de síntesis, como el enfoque eco-integrador (Naredo, 2003). En este sentido, cada indicador aportaría información específica a una determinada escala espacio-temporal concreta, sin suponer ninguno de ellos una referencia única *per se*.

Reflexiones finales

La Síntesis Emergética es una de las contribuciones más importantes que hizo a la ciencia el ecólogo H.T. Odum. Este método permite tener una visión, con una fuerte componente científica (termodinámica y ecológica), de las relaciones de interdependencia que se establecen entre los sistemas naturales y los sistemas socio-económicos, llegando a producir, a partir del concepto de emergencia, indicadores, que en una aproximación multi-criterio de participación y decisión, han permitido, en múltiples trabajos, entender bajo un mismo marco de estudio los flujos de materia, energía, información y dinero ligados a ecosistemas, sistemas agrícolas, sistemas urbanos, o tratar aspectos referentes al desarrollo, al comercio, a la termodinámica, al modelado de sistemas, a la ingeniería ecológica, a la restauración ecológica, etc. (Brown y Ulgiati, 2004a).

Finalmente, se quiere llamar la atención del colectivo de ecólogos sobre las posibilidades que ofrece un método con una fuerte componente ecológica, como la Síntesis Emergética, especialmente ahora que, tras el desarrollo de la Evaluación del Milenio, la cuestión de la valoración de servicios de los ecosistemas se encuentra en auge (ver Montes y Sala, en este monográfico).

Referencias

- Álvarez, S., P.L. Lomas, B. Martín, M. Rodríguez, y C. Montes. 2006. *La Síntesis Emergética ("Emergy Synthesis"): Integrando energía, ecología y economía*. Publicaciones de la Fundación Interuniversitaria Fernando González Bernáldez para los espacios naturales, 2. Documento de trabajo. Madrid.
- Brown, M.T. y S. Ulgiati. 2004a. Energy quality, emergy, and transformity: H. T. Odum's contributions to quantifying and understanding systems. *Ecological Modelling*. 178: 201-213.
- Brown, M.T. y S. Ulgiati. 2004b. Emergy analysis and environmental accounting. En *Encyclopedia of Energy* (Ed. Cleveland, C. J.), pp. 329-354, Boston University, Boston . MA. .
- Cai, T.T., T.W. Olsen, y D.E. Campbell. 2004. Maximum (em)power: a foundational principle linking man and nature. *Ecological Modelling*. 178: 115-119.
- Carpintero, O. 2006. *La bioeconomía de Georgescu-Roegen*. Montesinos, Barcelona .
- Costanza, R., R. d'Arge, R. de Groot, S. Farber, M. Grasso, B. Hannon, K. Limburg, S. Naeem, R. V. O'Neill, J. Paruelo, R. G. Raskin, P. Sutton, y M. van den Belt. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*. 387: 253-260.
- Di Donato, M. 2005. *Il nuovo paradigma dell'Economia Ecologica in un'applicazione dell'analisi emergetica alla provincia di Chieti*. Tesi di Laurea in Economia dell'Ambiente; Università Degli Studi 'G. D'Annunzio' Chieti-Pescara; Pescara, Italia
- Costanza, R. 2004. Value Theory and Energy. En *Encyclopedia of Energy* (Ed. Cleveland, C. J.), pp. 337-346, Boston University, Boston . MA. .
- Franzese, P.P., A. Scopa, A. Riccio, y G. Barone. 2003. Studio di sistemi complessi: la prospettiva ecodinamica in chimica-fisica ambientale. *Biologi italiani* 11: 39-45.
- Georgescu-Roegen, N. 1975. Energy and economic myths. *Southern Economic Journal*. 41: 347-381.

- Georgescu-Roegen, N. 1979. Energy analysis and economic valuation. *Southern Economic Journal*. 45: 1023-1058.
- Georgescu-Roegen, N. 1983. La teoría energética del valor económico: un sofisma económico particular. *El trimestre económico*. 198: 829-834.
- Hall, C. A. S. 2004. The continuing importance of maximum power. *Ecological Modelling*. 1-2.
- Hau, J. L. y B. R. Bakshi. 2004. Promises and problems of emegy analysis. *Ecological Modelling*. 178: 215-225.
- Lomas, P.L., S. Álvarez, M. Rodríguez, y C. Montes. En prensa. Environmental accounting as a management tool in the Mediterranean context: The Spanish economy during the last 20 years. *Journal of Environmental Management*.
- Lotka, A.J. 1922a. Contribution to the energetics of evolution. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 8 : 47-51.
- Lotka, A.J. 1922b. Natural selection as a physical principle. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 8 :151-4.
- Martínez-Alier, J. 1987. *Ecological Economics: energy, environment and society*. Basil Blackwell, New York, USA.
- Naredo, J.M. 2003. *La economía en evolución: Historia y perspectivas de las categorías básicas del pensamiento económico*. 3ªed, Ed. S. XXI, Madrid.
- Odum, H.T. 1988. Self-Organization, Transformity and Information. *Science*. 242: 1132-1139.
- Odum, H.T. 1994. *Ecological and general systems: An introduction to systems ecology*. University Press of Colorado, CO, .
- Odum, H.T. 1996. *Environmental accounting: emergy and decision making*. John Wiley, New York, .
- Odum, H.T. y E.C. Odum. 2000. *Modelling for all scales: An Introduction to System Simulation*. Academic Press, San Diego, .
- Odum, H.T. y E.C. Odum. 2001. *A prosperous way down: principles and policies*. University Press of Colorado, Boulder, CO, .
- Ropke, I. 2004. The early history of modern Ecological Economics. *Ecological Economics*. 50: 293-314.
- Ulgiati, S., M. Raugei, y S. Bargigli. 2006. Overcoming the inadequacy of single-criterion approaches to Life Cycle Assessment. *Ecological Modelling*. 190: 432-442.