

EL CAMINO A LA COMPLEJIDAD: POR QUÉ LA ECONOMÍA DEBERÍA SEGUIR A LA FÍSICA

LUIS M. VARELA CABO / CARLOS J. RICOY RIEGO
Universidad de Santiago de Compostela

Recibido: 11 de abril de 2012

Aceptado: 7 de mayo de 2012

Resumen: En la presente contribución mostraremos que la dirección dominante de la Economía contemporánea, tras su desarrollo inicial en el marco conceptual y analítico de la física clásica del siglo XIX, sigue anclada en su "core" conceptual –la teoría neoclásica de equilibrio general–, ignorando la evolución de la propia física a lo largo del siglo XX hacia el tratamiento de sistemas complejos, y aún la naturaleza misma de su objeto de conocimiento. Para ello, tras resumir brevemente el formalismo de la física clásica y la formulación de la propia economía neoclásica, analizaremos la evolución de ambas disciplinas a lo largo del pasado siglo, con atención particular al desarrollo de la termodinámica desde su formalismo de equilibrio hasta el concepto de estructuras disipativas de la termodinámica no lineal. Finalmente, apuntamos una serie de líneas en las que, a nuestro juicio, debe realizarse la adaptación de la economía a la física contemporánea, con todas sus consecuencias.

Palabras clave: Economía neoclásica / Física clásica / Termodinámica no lineal / Sistemas complejos / Economía de la complejidad.

THE ROAD TO COMPLEXITY: WHY SHOULD ECONOMICS FOLLOW PHYSICS

Abstract: In this contribution we will show that the mainstream of contemporary economics, after its initial development in XIXth century analytical and conceptual framework of classical Physics, is still anchored to its conceptual core, the general equilibrium theory, neglecting the evolution of physics itself towards the treatment of complex systems, and even the nature of its own knowledge object. For that, after a short summary of classical physics formalism and of the own neoclassical economics, we will analyze the evolution of both disciplines throughout the last century, with particular attention being focused on the development of thermodynamics from its original equilibrium formalism until the formalization of the concept of dissipative structures in nonlinear thermodynamics. Finally, we outpoint some lines along which we consider the adaptation of economics to contemporary physics must be done.

Keywords: Neoclassical economics / Classical physics / Nonlinear thermodynamics / Complex systems / Complexity economics.

1. INTRODUCCIÓN

La economía es uno de los modos de funcionamiento de ese sistema complejo que denominamos sociedad, compuesto por la trama de relaciones que todos los individuos de un grupo humano generan de manera espontánea entre sí. La actividad económica admite una comparación analógica con el conjunto de operaciones que constituyen el denominado metabolismo de los productos de los organismos biológicos. Así, mediante la actividad económica –constituida esencialmente por la producción, la distribución y el consumo–, el "organismo social" procesa la energía y los recursos (factores) productivos transformándolos en bienes que son distribuidos entre sus constituyentes para satisfacer sus necesidades, de la misma manera que en cualquier sistema vivo. Esto, unido a los mecanismos de procesamiento y eliminación de los residuos de la actividad, sitúa a la economía plenamente en el

marco conceptual de los sistemas complejos, al convertirla a ella misma en un sistema complejo autoadaptativo formado por un conjunto heterogéneo y jerarquizado de agentes inteligentes conectados en red, interaccionando de manera no lineal y dando lugar a fenómenos emergentes (Holland, 2006). De este modo, economía sería el nombre que damos a la estructura y a la dinámica de la intrincada trama de relaciones de producción e intercambio entre los hombres, autoorganizada y, por ello, necesariamente abierta y permanentemente muy lejos de su hipotético equilibrio.

En la actualidad esta visión de la economía –exigida por la termodinámica contemporánea– admite ya muy poca duda (Anderson *et al.* [ed.], 1988; Arthur *et al.*, 1997). No obstante, el *mainstream* de la ciencia económica contemporánea, centrado en la denominada teoría de equilibrio general, se mantiene dentro de un paradigma completamente diferente. La eliminación de esta disociación –aparentemente paradójica– entre la economía considerada como objeto de estudio y la economía como ciencia debe ser el debate principal de la teoría económica de nuestro tiempo.

Tras el desarrollo bien conocido de la economía política clásica¹, en las décadas de los años setenta a noventa del siglo XIX se desarrolla la denominada revolución marginalista, protagonizada por una serie de autores –como, entre otros, Walras o Jevons– que estaban al corriente del formidable desarrollo de la física clásica de su tiempo, surgida de la unificación lagrangiana y de la formalización de la conservación de la energía. La influencia de la física en la obra de estos autores está bien documentada por ellos mismos, y ha sido analizada en trabajos anteriores². Es hasta cierto punto natural su opción por el formalismo físico, pues siempre ha sido este el modelo de ciencia cuantitativa, el espejo en el que las demás vienen a mirarse. Así, por ejemplo, Jevons reconoce en su *Theory of Political Economy* que no existe diferencia sustancial entre el carácter general de su ecuación de intercambio y otros conceptos tratados en muchas ramas de la ciencia física. Por otro lado, como recoge Mirowski (1989), Jevons en su obra póstuma *Principles of Economics* escribe de manera explícita que “*The notion of value is to our science what that of energy is to mechanics*”. Igualmente explícito es Leon Walras en su obra *Elements of Pure Economics*, cuando compara la teoría pura de la economía con la de las ciencias físico-matemáticas.

Mirowski recoge, igualmente, las concepciones acerca de la relación de la ciencia económica con la física de otros neoclásicos como Francis Ysidro Edgeworth, Vilfredo Pareto o Irving Fisher, en las que se refleja de manera explícita la similitud que estos autores estiman que debe tener la economía con la física, y que los impulsa a realizar de manera consciente una adaptación de los conceptos de la mecánica de su época al problema económico. Naturalmente, como cualquier otro avance del conocimiento humano, este debe ser, sin duda, valorado en su propio contexto histórico. En él, este esfuerzo de adaptación del formalismo de la física al

¹ En ese artículo no consideramos su desarrollo ni tampoco el de otras corrientes de pensamiento económico que se mueven fuera de los contornos del *mainstream*.

² Véase, en particular, la excelente monografía de Mirowski (1989) y las referencias contenidas en ella.

desarrollo de una mecánica social a la altura de la mecánica celeste debe ser positivamente valorado, sea cual sea la opinión que en la actualidad tengamos de la teoría que diseñaron, pues, ciertamente, fue un esfuerzo importante destinado a poner a la altura de la física de su tiempo la teoría económica de la época.

Como veremos a lo largo de este trabajo, no ha sido esta la evolución posterior, pues la economía no ha incorporado, a nuestro juicio, todos los elementos que la física ha ido desarrollando posteriormente para el tratamiento de sistemas complejos, categoría mucho más útil para el análisis de la economía que los modelos de sistemas simples que se encuentran en la base del modelo neoclásico canónico. Antes bien, se ha aferrado al modelo neoclásico originario y, en su caso, ha introducido en él diversas “imperfecciones” que apartarían a la economía de su funcionamiento óptimo reflejado en el equilibrio general. Así, por ejemplo, todas las implicaciones de la revolución que supuso la introducción de la probabilidad en las leyes fundamentales de la física mediante la mecánica estadística y la mecánica cuántica no han sido adecuadamente trasladadas a la economía. Por otro lado, y lo que resulta más incomprensible, solo en los años sesenta del pasado siglo se introdujo en el pensamiento económico la entropía, mediante la obra de Georgescu-Roegen (1971), aproximando economía y termodinámica convencional de equilibrio tras más de un siglo de conocimiento de sus leyes fundamentales. No obstante, aún hoy no se ha formulado una equivalencia plena entre las magnitudes termodinámicas y sus homólogas económicas, y mucho menos se han generalizado los trabajos de Georgescu-Roegen para incorporar todos los avances de la termodinámica de procesos irreversibles en las regiones lineal y no lineal de la escuela de Bruselas. Y ello, pese a que, en palabras de Schneider y Sagan (2005) en su obra *La termodinámica de la vida. Física, cosmología, economía y evolución*, la termodinámica ha llegado a ser la ciencia-madre de todas las ciencias de la complejidad.

En efecto, solo en el marco de la termodinámica no lineal es posible comprender la aparición espontánea de orden espacio-temporal en sistemas abiertos muy alejados de su equilibrio, lo que, sin duda, podría facilitar la comprensión de la formación de las estructuras económicas espacio-temporales observadas (corporaciones, ciclos, inhomogeneidades geográficas en la economía...). Tampoco han sido incorporadas al núcleo económico contemporáneo otras herramientas de estudio de sistemas complejos como la teoría de redes complejas o la teoría de la información. Es, por ello, pertinente realizar un análisis crítico del estado relativo en que se encuentran física y economía, lo que, como veremos en este trabajo, obliga a plantearse previamente la naturaleza última del objeto de estudio de esta disciplina, ese incesante ruido de la sociedad que denominamos economía.

Este trabajo se estructura en cuatro secciones, de las cuales la primera es esta introducción. La segunda sección contiene una breve excursión histórica por el desarrollo de la física desde su origen hasta el momento presente, enfatizando de manera particular el estudio del desarrollo histórico de la termodinámica como rama de la física especialmente relevante para la economía. En la tercera sección se realiza

una breve revisión crítica del formalismo neoclásico originario de la economía y de su evolución histórica a lo largo del siglo XX hasta los enfoques contemporáneos. Finalmente, en la cuarta sección se analizan la aparición y el desarrollo de las ciencias de la complejidad, un campo en efervescente avance en la actualidad, que progresivamente va traspasando nuevas fronteras³, apuntando algunas direcciones de futuro que, a nuestro juicio, deben ser exploradas para una auténtica formulación de la economía de la complejidad.

2. FÍSICA: DEL SIMPLE MOVIMIENTO A LOS SISTEMAS COMPLEJOS

Tras el abandono del holismo de la teosofía medieval, superada ya la fase de los debates nominalista y de los universales, formalizado el principio de parsimonia por Guillermo de Occam, el pensamiento moderno estaba en posición de volver a situar el estudio de los fenómenos naturales en el centro de sus preocupaciones; y de hacerlo mediante el formalismo adecuado, basado en el método experimental del *Novum Organum* de Francis Bacon, y de la formulación matemática de sus preguntas y resultados a la manera de Galileo. Todo ello mediante métodos de investigación claros y precisos, basados en la presunción de que para el estudio del comportamiento de un determinado sistema físico este debe separarse de su entorno –operación que siempre resulta posible, según el pensamiento de la época–, y situarse en otro ámbito en el que pueda someterse adecuadamente a la interrogación hábil y exhaustiva del experimentador para formular leyes matemáticas que permitan la predicción de su comportamiento general. Solo así podremos conocer las leyes de la naturaleza que, obedeciéndolas, como dirá Bacon, nos permitirán dominarla.

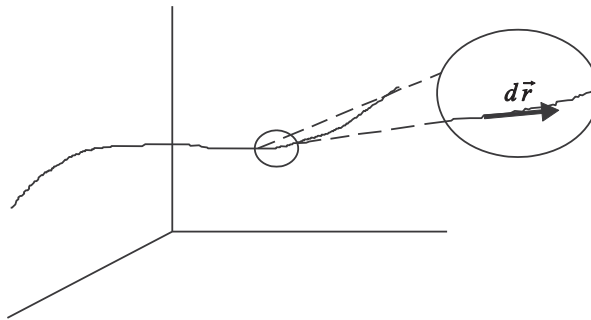
De manera natural, la ciencia moderna fija su atención, en primer lugar, en el problema del movimiento, cuya posibilidad y características ya habían sido un tema permanente en el pensamiento filosófico de la antigüedad clásica y medieval. Es en este marco problemático de la descripción del movimiento (cinemática) y de sus causas (dinámica) donde se produce la formulación de las obras de Leibniz y Newton relativas al desarrollo de una herramienta matemática que permitiese la descripción de sistemas y procesos descomponibles en contribuciones infinitesimalmente pequeñas sin pérdida de propiedades esenciales. Estos sistemas, convencionalmente designados como simples, son los que se encuentran en la base de la física clásica⁴: en ellos el todo no es sino la suma de partes, el todo puede ser redu-

³ En este bloque temático se incluye la contribución de B. Miedes: “Complejidad y economía: distintas corrientes de pensamiento, distintas lecturas”, en la que se recogen diversas aproximaciones que se han hecho a la economía desde la perspectiva de la complejidad.

⁴ En este trabajo usaremos el término física clásica no como sinónimo de física newtoniana, sino para referirnos al conjunto de ramas de la física que se había desarrollado con anterioridad a la formulación de la mecánica cuántica a partir del año 1900. Sería difícil incluir bajo la denominación de newtonianas ramas como la mecánica lagrangiana o la hamiltoniana, tan dependientes del concepto de campo y de principios de conservación no disponibles para Newton; el electromagnetismo, la óptica electromagnética o la termodinámica.

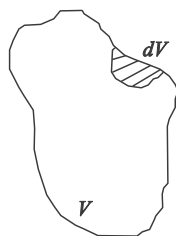
cido a sus partes. Así, por ejemplo, la causa total no es más que la adición de las causas parciales, lo que constituye el principio de superposición, herramienta esencial para la comprensión de tantos fenómenos. Tanto las causas (fuerzas) como los efectos (movimientos) de los sistemas y procesos físicos estudiados en este marco son el resultado de la adición de una infinita cantidad de contribuciones elementales que contribuyen al resultado final. Así, la curva de la figura 1a no es sino el resultado de la adición de una cantidad infinita no numerable de elementos infinitesimales de línea $d\vec{r}$ que integrados (i.e. sumados continuamente a la manera descrita por Leibniz en su *Nova Methodus* del año 1684) nos devuelven el conjunto de la línea.

Figura 1a.- La curva como resultado del despliegue de un infinitésimo



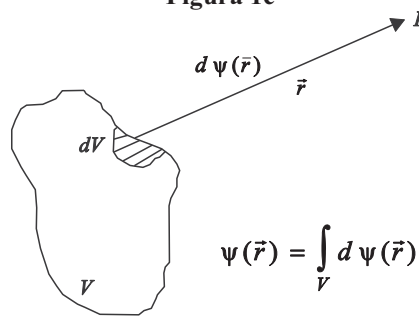
De la misma forma, esta nueva matemática permitirá recomponer la cantidad total de una cierta magnitud activa –masa o carga, por ejemplo– presente en un cuerpo después de dividirlo en partes infinitesimalmente pequeñas y sumarlas de nuevo a todo el volumen del cuerpo (figura 1b), o la perturbación total a una cierta distancia de un cuerpo con una magnitud activa como resultado de la superposición de las perturbaciones provocadas por cada una de sus partes (figura 1c).

Figura 1b



$$\varphi_t = \int_V \rho(\vec{x}) d\vec{x}$$

Figura 1c



$$\psi(\vec{r}) = \int_V d\psi(\vec{r})$$

Todo este programa se completaba con la formulación de leyes en forma de ecuaciones diferenciales e integrales –ecuaciones de Newton, Lagrange o Hamilton– que, una vez determinadas las condiciones iniciales, permitían una descripción completa del estado de movimiento del móvil en cualquier instante posterior (determinismo).

En resumen, de manera muy sucinta y simplificada podemos esquematizar este programa en los siguientes puntos:

- La existencia de un universo estructuralmente estático: en el marco de la física clásica las estructuras están dadas previamente a cualquier consideración y no evolucionan en el tiempo.
- Se supone que los sistemas objeto de estudio son separables del resto del universo, y que son sistemas simples, i.e. que las leyes que gobiernan el conjunto del sistema son las mismas que gobiernan las partes constituyentes. Esto permite la ejecución de un programa reduccionista en el que el comportamiento del todo se puede reducir a las leyes que gobiernan sus constituyentes.
- Principio de superposición: los efectos netos son el resultado determinista de la adición de causas (fuerzas o magnitudes activas).

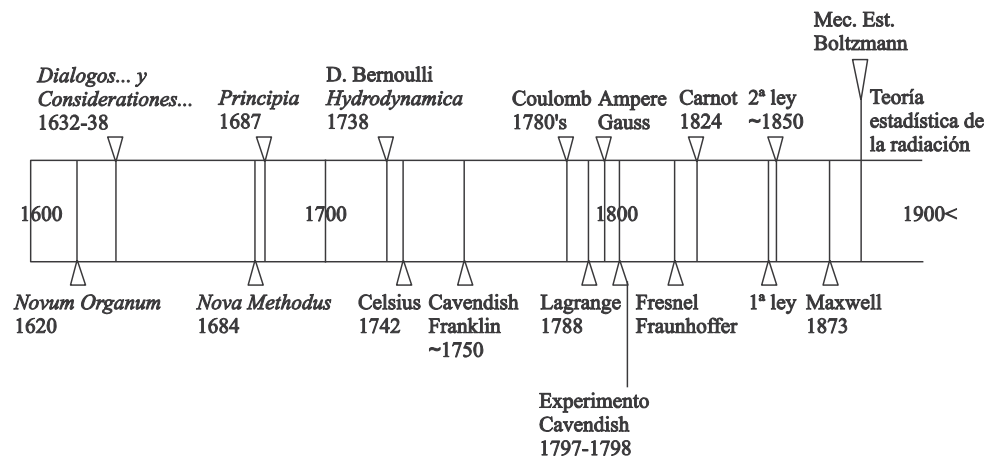
A pesar de sus evidentes restricciones, este programa reduccionista y determinista de la física clásica había demostrado toda su potencia hacia el momento en el que se produce en la economía la llamada revolución marginalista, i.e. hacia las décadas finales del siglo XIX. En sus dos siglos de existencia había logrado avances espectaculares en mecánica (con la formulación de la síntesis newtoniana; la mecánica analítica, lagrangiana y hamiltoniana; el principio de conservación de la energía, que contribuyó a liberar a la física de éteres y sustancias; o la formulación del concepto de campo, entre otros); en electromagnetismo, magistralmente condensado en las ecuaciones de Maxwell; en óptica; en mecánica de fluidos, etcétera⁵.

Las fronteras de la física –y en general de las ciencias naturales– y la fascinación que ejercía sobre ciudadanos y científicos no parecía conocer límites como medio de expansión del conocimiento y control de la naturaleza, pero también como seguro medio para el desarrollo y progreso de la técnica y de la economía de las naciones. El sueño laplaciano –la posesión de una ecuación del todo que, dadas las condiciones iniciales de las partículas que componen el universo, permita la predicción de su evolución posterior–, parecía al alcance mismo de la mano (figura 2). Y, sin embargo, como sucede tantas veces con los imperios en su esplendor, ya tenía dentro de sí el germen de su superación, y todo se encontraba preparado para la

⁵ No pretendemos ser exhaustivos en este punto, pues este bloque temático ya incluye la contribución de J. Carrete, “Posibilidad, necesidad y tratamiento de la complejidad en la física: una aproximación histórica”, en la que se expone el camino recorrido por la física desde sus orígenes hasta la complejidad, a la que referimos al lector interesado.

generalización de este formalismo. Para seguir cumpliendo su programa, la física debía de cambiar radicalmente, sobre todo en dos aspectos cruciales: la comprensión de la mecánica del microcosmos⁶ y los fundamentos últimos de la transformación de calor en trabajo, que ocultaban una de las más fundamentales leyes de la naturaleza como es la segunda ley de la termodinámica.

Figura 2.- Principales hitos del desarrollo de la física clásica



Por lo que respecta a estos últimos, ya desde el principio mismo de la descripción física moderna se había observado la imposibilidad de separar de manera completa el sistema de su entorno, al existir siempre la comunicación de algo entre sistema y entorno que hacía variar el estado de movimiento del cuerpo, lo que se incluyó en el formalismo mecánico en forma de fuerzas disipativas. Estas interacciones parecían violar el principio de conservación de la energía, que con tanto deudado y esfuerzo se había construido.

Para la comprensión de estas fuerzas, del calor asociado a estos y a otros procesos y de los principios de funcionamiento de las máquinas térmicas y su optimización, se desarrollaron durante el siglo XIX las dos leyes fundamentales de la termodinámica: la primera ley o principio de conservación de la energía, basada en la equivalencia de calor y trabajo mecánico a efectos de la variación de la energía interna del cuerpo⁷; y la segunda ley, que establece la existencia de una dirección preferente en la evolución espontánea de los sistemas termodinámicos, y que condujo en última instancia a la introducción de la entropía en el formalismo de la fisi-

⁶ No nos extenderemos aquí en el desarrollo de la mecánica cuántica.

⁷ Esta equivalencia había sido formulada por James Prescott Joule en Manchester en el año 1845, que terminó definitivamente con la concepción sustancialista del calor latente en la teoría del calórico. La forma contemporánea del principio de conservación establece que la variación de la cantidad de energía del cuerpo (energía interna) U se debe al intercambio de calor (Q) y trabajo (W) con el entorno: $\Delta U = Q + W$.

ca y a su conexión con el desorden de estado y la irreversibilidad de los procesos de transformación⁸. Los procesos y estados de equilibrio quedaron así plenamente explicados desde la perspectiva fenomenológica.

El éxito se completó con la formulación, esencialmente debida a Boltzmann, de los fundamentos mecánico-microscópicos de la segunda ley en la teoría cinética, y de la interpretación estadística de la entropía (mecánica estadística) que atribuye una mayor probabilidad a los microestados más desordenados (i.e. de mayor entropía) de un sistema que a los más ordenados, permitiendo interpretar la observación de una dirección estadísticamente preferente para los procesos físicos macroscópicos, una “flecha del tiempo” en aparente contradicción con la reversibilidad de los procesos mecánicos.

Todo este edificio de la termodinámica clásica de estados y procesos de equilibrio –culminada por la obra de Josiah Willard Gibbs para sistemas abiertos– permitió la comprensión de infinidad de fenómenos que involucraban –siempre lo hacen los procesos macroscópicos reales– la transmisión de energía en forma de calor. No obstante, no se analizan en este formalismo de la “termostática” los procesos cronológicos reales, los procesos irreversibles, sino que se consideran procesos estáticos equivalentes en el espacio termodinámico por los que el sistema transita, permanentemente en equilibrio, y en los que sus estados son parametrizables en términos de variables y funciones de estado⁹. Ninguna atención se prestaba a los procesos irreversibles como tales, considerados meros procesos “*parásitos*” (Prigogine, 1977)¹⁰.

Y este orden de cosas se prolonga hasta las obras de Pierre Duhem y de Théophile de Donder –fundador de la escuela de Bruselas–, que comenzaron el estudio sis-

⁸ La segunda ley de la termodinámica fue desarrollada entre los años 1824 –año en el que se publica *Sur la puissance motrice du feu*, de Nicolas Sadi Carnot– y 1865 –año en el que Clausius culmina su formulación–, e involucra el trabajo, entre otros, de Sir William Thomson (Lord Kelvin). En su versión definitiva, la segunda ley de la termodinámica se debe a Rudolf Clausius, que también introduce el concepto de entropía (S): “*Buscaremos ahora un nombre apropiado para S . De la misma manera que hemos denominado U a la cantidad de trabajo del cuerpo, podríamos denominar S al contenido de transformación de este. No obstante, me ha parecido muy adecuado tomar los nombres para las cantidades científicas importantes de las lenguas clásicas, para que puedan denotarse de manera similar en todas las lenguas contemporáneas. Por tanto, propongo que llamemos S a la entropía del cuerpo, del griego «ετροπη», que significa transformación. He elegido intencionadamente la palabra entropía para que sea lo más parecida posible a energía, puesto que las dos magnitudes que representan estas palabras tienen un significado físico tan relacionado que una similitud en sus nombres me ha parecido apropiada*” (Clausius, 1867).

⁹ En particular, en los procesos pseudoestáticos el sistema transita por una sucesión continua de estados intermedios de equilibrio. Por otro lado, en los procesos cuasiestáticos el sistema circula por una sucesión de estados intermedios de equilibrio y, además, las fuerzas que realizan trabajo sobre el sistema son, precisamente, las que lo mantienen en equilibrio, esto es, el sistema se encuentra también en equilibrio con el medio en cada uno de los estados intermedios del proceso. En la práctica, estos últimos procesos se consideran equivalentes a los procesos reversibles, para los que existiría una transición inversa con los mismos estados inicial y final, y tanto el sistema como su entorno recuperarían en todos los aspectos sus estados previos al proceso. No obstante, esta equivalencia dista mucho de ser plena.

¹⁰ En la autobiografía de Prigogine se puede encontrar un excelente resumen de la evolución de la termodinámica en el siglo XX <http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1977/prigogine.html>.

temático de los procesos en los que existe el flujo de alguna magnitud física (masa, carga, calor...) inducida por una fuerza termodinámica generalizada (gradiente de concentración, diferencia de potencial o gradiente de campo eléctrico, gradiente de temperatura...). Esto abrió la puerta para comprender la existencia espontánea de estructuras organizadas –entre ellas la vida–, algo considerado hasta entonces completamente incompatible con la segunda ley de la termodinámica.

Los primeros estudios se centraron en el denominado régimen lineal, una región próxima al equilibrio global del sistema en la que fuerzas (\vec{F}) y flujos (\vec{J}) muestran una dependencia lineal, $J_k = \sum_j L_{kj} F_j$, y en la que podemos suponer la existencia de equilibrio local. La comprensión y sistematización de los fenómenos de transporte en esta región recibieron un fuerte impulso con el establecimiento del teorema de reciprocidad de Onsager (1931), que establece la simetría de los coeficientes cinéticos en ausencia de campo magnético $L_{jk} = L_{kj}$, considerada, incluso, como una cuarta ley de la termodinámica¹¹.

Por otro lado, Prigogine (1945) formuló el denominado teorema de mínima producción de entropía, válido para los estados estacionarios en esta región lineal, un resultado fundamental de la denominada termodinámica lineal de los procesos irreversibles. Esta rama de la termodinámica ha sido aplicada a una gran cantidad de fenómenos de transporte, como puede comprobarse en las obras del propio Prigogine o en autores como de Groot y Mazur (1962) o Katchalsky y Curran (1946).

Pero es, quizá, en la demostración de que en la región alejada del equilibrio, en la que la linealidad de la relación entre fuerzas y flujos ya no es válida (ni, por lo tanto, las relaciones fenomenológicas de Onsager), existen transiciones desorden-orden compatibles con la segunda ley, donde el formalismo de la termodinámica ha alcanzado sus mayores cotas hasta la fecha. Este resultado, debido esencialmente a Glansdorff y Prigogine (1971), condujo a la formalización del concepto de estructuras disipativas. Rápidamente se construyeron modelos cinéticos –como el *Brusselator*– que permitieron analizar la variedad de estructuras que se generaban en procesos de reacción-difusión y se consideraron reacciones químicas oscilantes –la más famosa es, sin duda, la de Belousov-Zhabotinsky–, tanto homogéneas como inhomogéneas, a la luz del nuevo formalismo.

El surgimiento de orden espacio-temporal –reacciones oscilantes, ondas viajeras, estructuras de Turing– en sistemas abiertos en la región no lineal, suficientemente lejos del equilibrio, abrió la posibilidad de conciliar la existencia de estructuras ordenadas –y ordenadoras como los seres vivos– con la temida segunda ley de la termodinámica. Tal y como relata el propio Prigogine (1977) en su autobiografía antes citada, estos estudios en colaboración con Glansdorff iban a “[...] give birth to a general evolution criterion which is of use far from equilibrium in the non-linear branch, out of the validity domain of the minimum entropy production

¹¹ La tercera, que establece la inaccesibilidad del cero absoluto de temperatura, se debe en versiones diferentes a Nernst y Planck.

theorem. Stability criteria that resulted were to lead to the discovery of critical states, with branch shifting and possible appearance of new structures. This quite unexpected manifestation of «disorder-order» processes, far from equilibrium, but conforming to the second law of thermodynamics, was to change in depth its traditional interpretation. In addition to classical equilibrium structures, we now face dissipative coherent structures, for sufficient far-from equilibrium conditions”.

Pero lo más sorprendente fue, quizá, que el origen de este nuevo orden en sistemas abiertos –sorprendente él mismo a su vez–, de esta nueva capacidad de la materia de autoorganizarse estructuralmente, fuese debida a fenómenos microscópicos de origen aleatorio como son las fluctuaciones microscópicas libres y espontáneas de sus constituyentes. Nuevamente en palabras del propio Prigogine (1977): “*But the introduction of the concept of dissipative structure was also to have other unexpected consequences. It was evident from start that the structures were evolving out of fluctuations. They appeared in fact as giant fluctuations, stabilized through matter and energy exchanges with the outer world*”.

Este orden a través de fluctuaciones, la capacidad de ordenarse –e incluso de organizarse– a partir de fluctuaciones estocásticas de origen microscópico y mantenerse en tal estado mediante la gestión de flujos de energía y entropía puede considerarse actualmente como un mecanismo general de organización del conjunto de la realidad. Así, es posible encajar en el formato de estructuras disipativas, emergidas a partir de las fluctuaciones libres y espontáneas de sus constituyentes, desde los procesos de reacción-difusión hasta los mercados financieros. Estas estructuras disipativas se mantienen ellas mismas organizadas a base de importar flujos energéticos, degradarlos y exportar flujos de alta entropía al entorno a la mayor tasa posible –máxima producción de entropía¹²–.

El propio Prigogine, consciente de que las implicaciones de esta nueva rama no lineal de la termodinámica excedían con mucho el ámbito de la física, lo extendió a fenómenos de la vida social como el problema del tráfico (Prigogine y Hermann, 1971). Es así como la termodinámica, provista de este nuevo marco conceptual, ha llegado a ser “*la ciencia-madre de todas las ciencias de la complejidad*”. Y es en esta frontera –en la de la complejidad–, que recuerda en tantos aspectos al enfoque holístico previo a la aparición y desarrollo de la ciencia moderna, donde hoy se encuentra el horizonte problemático de la física, y con ella del resto de las ciencias.

Centraremos ahora nuestra atención en el recorrido histórico de la economía, en tantos sentidos similar al de la propia física, analizando en primer lugar su etapa determinista y reduccionista –el denominado formalismo neoclásico del equilibrio general–, para abordar después el tránsito hacia la etapa de la complejidad y de la emergencia que, como otras ciencias han hecho ya, debe necesariamente acometer.

¹² Evidentemente, en este marco es posible comprender de manera muy directa el origen de los problemas económico y ecológico.

3. ECONOMÍA CONVENCIONAL: UN MODELO REDUCCIONISTA PARA UN SISTEMA INTRÍNSECAMENTE COMPLEJO

“No dejes que la realidad te estropee un buen titular”, dicen los periodistas cuando se refieren a una buena cabecera. Algo parecido podría predicarse del que es en la actualidad el núcleo del análisis económico contemporáneo, a saber, la teoría del equilibrio general, que se extiende de hecho al análisis macroeconómico.

Tras la etapa clásica del pensamiento económico –representada principalmente por Smith, Ricardo y Marx–, esta teoría se ha ido construyendo con aportaciones diferentes desde la década de 1870, en la que se inicia la denominada revolución marginalista encabezada por Leon Walras, William Stanley Jevons, Vilfredo Pareto e Irving Fisher. En lo que sigue analizaremos la profunda influencia que tuvieron la visión y los métodos de la física clásica en el desarrollo de este formalismo teórico de la economía y como, en nuestra opinión, se ha producido en esta ciencia una recepción muy parcial de los avances que tuvieron lugar hasta la fecha en el campo de la física que, como ya vimos en la sección anterior, culminan en la actual física de los sistemas complejos.

A grandes rasgos, el postulado central de la economía neoclásica contemporánea –el comúnmente llamado *mainstream*– es que la economía es el resultado de la acción de agentes racionales independientes que maximizan la utilidad y el beneficio interactuando en el seno de mercados perfectamente competitivos, en los que toda la información económicamente relevante está disponible para todos ellos en los precios de las mercancías, como consecuencia de lo cual se establece en el sistema económico un “equilibrio general” óptimo, estable y autoajustado.

En el ámbito de los mercados financieros, estas asunciones de mercado eficiente y completo están en la base del bien conocido modelo estándar de finanzas o modelo de Black-Merton-Scholes. En él se supone que: i) no existe asimetría informativa alguna entre los agentes –toda la información relevante se encuentra en el precio de los activos, y sólo en el precio–; ii) no hay *gaps* significativos entre los precios de mercado y los fundamentales; y iii) el mercado es completo, esto es, siempre hay comprador y vendedor a cualquier precio. En estas condiciones los precios de mercado de las acciones ejecutan un “camino aleatorio” o vuelo gaussiano, obedeciendo a una distribución log-normal en el polo de atracción gaussiano, por lo que el riesgo puede ser completamente neutralizado mediante la suscripción de los oportunos derivados (opciones) sobre los activos subyacentes. Es evidente que estos modelos, como cualquier otro modelo en cualquier otro ámbito, suponen una simplificación de la economía con vistas a posibilitar su tratamiento matemático. La cuestión estriba en decidir si esta simplificación es admisible, i.e. si no ignora los rasgos fundamentales del objeto de estudio. Con carácter previo a esto es conveniente que hagamos un repaso por la génesis y desarrollo históricos del modelo.

La denominada revolución marginalista tiene lugar entre las décadas de 1870 a 1890 con las obras de Walras, Jevons, Edgeworth o Pareto. Como destaca Mirows-

ki, el proceso de unificación de la teoría física en torno a principios variacionales y el principio de conservación de la energía, completada hacia el año 1840, fue determinante para la construcción de la teoría neoclásica: “*In many ways, the episode of the supposed simultaneous discovery of neoclassical value theory in the 1870s resembles nothing so much as that other putative instance of simultaneous discovery, the so called discovery of energy conservation in the 1840s. [...] Both energy and utility were based on large scale prohibitions of «something for nothing»: perpetual motion was banished in physics; natural scarcity was reified in economics*” (Mirowski, 1989, p. 218).

Mirowski destaca, además, el hecho de que todos los protagonistas de la revolución marginalista hayan incluido en sus obras publicadas de dónde obtuvieron la inspiración necesaria para el desarrollo del nuevo enfoque de la economía: de la física y de sus métodos coetáneos. Pero, probablemente, es en la obra de Irving Fisher donde mejor se establece la analogía entre ambas disciplinas. La tesis de Fisher –codirigida por Josiah Willard Gibbs– contiene incluso una relación biyectiva de los conceptos de una disciplina con los de la otra¹³.

A grandes rasgos la equivalencia del formalismo neoclásico y el de la física clásica reposa sobre la transformación de la utilidad –supuesta en ese momento cardinal– de cada individuo en un campo escalar en el espacio de mercancías, $U = U(x_1, \dots, x_n)$, del que se puede derivar un campo vectorial conservativo de precios, $\vec{P} = \vec{\nabla}U(x_1, \dots, x_n)$. Este es el responsable de cualquier transformación en el espacio económico, que progresa, dentro de las restricciones presupuestarias, en la dirección del máximo de utilidad.

Es evidente que estas asunciones estaban directamente extraídas del formalismo de la mecánica clásica del siglo XIX, que ya hemos resumido con anterioridad, y concretamente del movimiento en el seno de campos conservativos, de cuyo formalismo se podían extraer matemáticamente multitud de conclusiones en el campo de la economía¹⁴. Así, el campo de utilidad indica el camino a los agentes a través de señales-fuerzas que denominamos precios, y el equivalente económico del trabajo realizado por la fuerza-precio –el resultado del cambio del punto de aplicación de los precios en el espacio económico que viene a modificar el contenido “energético” del sistema económico– es el gasto total

$$E = \int_A^B \vec{P} d\vec{x}$$

En este marco, la trayectoria concreta seguida por el “móvil” económico –fuera este un mercado aislado como en el caso de Jevons, o el conjunto de todos los mer-

¹³ Remitimos al lector interesado en los detalles de esta relación a las pp. 224-225 de la referencia de Mirowski.

¹⁴ No nos extenderemos en este punto, pues el lector puede consultar multitud de obras excelentes, entre ellas la del propio Mirowski (1989).

cados interconectados como en el caso de Walras— es indiferente para el cálculo del efecto de una transformación económica (*path independence*), pues solo son relevantes sus estados inicial y final. Todo esto se completa con la hipótesis —como si de un proceso termodinámico reversible estuviésemos hablando— de que en los estados intermedios el sistema también está en equilibrio, i.e. la transformación económica es siempre reversible. El proceso económico no sería sino un movimiento en el seno de este campo conservativo, sometido a la correspondiente restricción presupuestaria, lo que llevó a la reformulación lagrangiana y hamiltoniana del formalismo. Toda la economía quedaba, pues, reducida a mecanismo, cumpliendo el ideal de la formulación de la física social, tan en boga en la época.

En este nuevo marco —simple y elegante— era posible recuperar de manera sencilla leyes económicas que aparecían como deducciones inmediatas de las leyes básicas del movimiento. Por ejemplo, la condición de campo de fuerzas (precios) conservativo implica que $\vec{P} = \vec{\nabla}U(x_1, \dots, x_n)$ es un campo irrotacional, $\vec{\nabla} \times \vec{P} = 0$, lo que conduce a “[the] integrability conditions in neoclassical theory, which often appear under the rubrics of Antonelli conditions, Slutsky conditions, or the strong axiom of revealed preference” (Mirowski, 1989, pp. 232-233):

$$\frac{\partial P_i}{\partial x_j} = \frac{\partial P_j}{\partial x_i} \quad i, j = 1 \dots n$$

Así pues, los padres de la revolución marginalista parecían encontrarse ante algo más que una simple metáfora al aplicar la nueva física. Su apropiación del concepto de campo y de sus principios de conservación asociados que la física había llegado a formular en la época constituyen la esencia del formalismo neoclásico, que confirió a la economía el aura de la más matemática de las ciencias sociales y al funcionamiento de los mercados la predictibilidad del campo gravitatorio y un fin ideal de equilibrio estable y autoajustado.

Con independencia de la escuela de pensamiento a la que uno se adscriba en la actualidad, hay que reconocer que la derivación de este formalismo en el siglo XIX supuso un importante avance en la ciencia económica, iniciando una descripción matemática de la economía que consiguió desplazar prácticamente al resto de las escuelas de pensamiento económico —“with the single exception of Marxism”, dirá Mirowski—.

Durante el siglo XX una pléthora de grandes economistas “*consolidated and built on the foundations laid out by the Marginalists*”, en palabras de Beinhocker (2006). Así, en la primera parte del siglo XX destacaremos a Alfred Marshall, John Hicks —responsable de la síntesis de las obras de Walras, Marshall y Pareto en su *Value and Capital*—, John von Neumann y Óskar Morgenstern. Tras estas aportaciones se producen contribuciones de Paul Samuelson y, en especial, de Kenneth Arrow y de Gerard Debreu, que demostraron que el equilibrio general de los mercados existe y

es óptimo en el sentido paretiano del término, estableciendo de este modo de forma rigurosa la teoría neoclásica de equilibrio general. Todos los precios –señales metabólicas de las condiciones de demanda y oferta del mercado– se coordinan automáticamente para dar lugar a este equilibrio general, y cuanto más cerca estemos de la competencia perfecta, más próximos estaremos del equilibrio óptimo y perfecto, del ideal económico. Y todo ello obtenido únicamente a partir de un conjunto muy reducido de hipótesis, no todas ellas exentas de polémica.

La teoría neoclásica del equilibrio general toma como datos la dotación inicial de recursos (factores) productivos y su distribución, las preferencias de los agentes individuales y la tecnología de producción. La optimización de las preferencias por parte de los consumidores (maximización condicionada de la utilidad) y la maximización del beneficio por parte de las “empresas” condicionada a la tecnología, esto es, a las posibilidades de combinar factores para obtener bienes, dan lugar a las funciones de demanda y oferta de bienes, y de oferta y demanda de factores. Sobre la base de estas funciones, en el equilibrio de los mercados se determinan conjuntamente las cantidades de bienes producidos y, por lo tanto, la asignación de los factores a la producción de esos bienes, los precios de los bienes y de los factores y la distribución de la renta, la cual depende de la valoración de los recursos productivos.

Nótese que la teoría es a la vez una teoría del valor (de los precios de los bienes), de la distribución (de los precios de los factores productivos) y del nivel de actividad (del nivel de producción y del uso de los recursos). En esta visión, como consecuencia del funcionamiento libre del mecanismo de mercado –del sistema de precios–, los mercados de bienes y factores se vacían; el equilibrio general supone el pleno empleo de los recursos. Ante cualquier perturbación, los precios (de los bienes y de los factores) se ajustan de tal modo que el sistema recupera el equilibrio. La consecución del equilibrio ante la variación de los precios depende de las posibilidades de sustitución entre bienes en el consumo y de las posibilidades tecnológicas de sustitución entre factores en la producción.

La teoría que de forma esquemática acabamos de exponer constituye el punto de partida (la base) o, en su caso, el punto de referencia fundamental (*benchmark*) del *mainstream* del análisis económico. De hecho, ya en las primeras décadas del siglo pasado, los principios y las conclusiones centrales de la teoría del equilibrio general constituían la base de la visión dominante del funcionamiento del sistema económico. A este respecto, el análisis de Keynes del equilibrio con desempleo se interpretó en principio como una amenaza a la tradición establecida; sin embargo, no se tuvo que esperar mucho para que las principales conclusiones de Keynes fuesen integradas en el acervo común de la teoría neoclásica.

El elemento central del análisis de Keynes lo constituye el denominado principio de la demanda efectiva, esto es, la proposición de que el nivel de producción y empleo (el nivel de actividad) está determinado por el nivel de gasto (de demanda) y, en particular, por el volumen de inversión, y de que la necesaria igualdad entre el

ahorro y la inversión se alcanza (se mantiene) a través de las variaciones del propio nivel de producción (de renta). A este respecto, el planteamiento es bien simple: dada la noción fundamental de que la demanda de consumo depende de la renta y que, dado el nivel de esta última, siempre existe una brecha de gasto (de demanda) entre ese nivel y el gasto de consumo asociado a él, se infiere que para justificar (garantizar) cualquier nivel de renta –para que este sea efectivo, para que se realice efectivamente– debe existir un volumen de inversión suficiente como para absorber la brecha de gasto entre la renta y el consumo correspondiente –para absorber el exceso del producto total sobre lo que la comunidad decide consumir para ese producto–. Así, en este planteamiento el volumen de inversión, en conjunción con la propensión a consumir, determina el nivel de producción (renta); esto supone, claro está, que la producción (renta) puede estar en equilibrio a cualquier nivel y no solo al nivel correspondiente al pleno empleo –o que garantiza el pleno empleo–.

Esta visión del proceso económico supone una ruptura con la concepción tradicional de que el nivel de producción (la cantidad producida y demandada de todos y cada uno de los bienes) se determina conjuntamente con los precios, de que el equilibrio (de pleno empleo) se alcanza a través del juego de los precios relativos y, por lo tanto, de que la igualdad entre el ahorro y la inversión se mantiene a través de las variaciones del tipo de interés. De suyo, el principio de la demanda efectiva no depende en absoluto del papel equilibrador de los precios relativos y, en particular, del papel del tipo de interés; de hecho, la propensión al consumo se contempla como el eslabón fundamental que liga el volumen de inversión, considerado independiente del propio proceso de generación de renta, con el nivel de producción y el volumen de ahorro correspondiente; así, las variaciones del producto (de las cantidades) ocupan el lugar del mecanismo de precios (de la oferta y la demanda) como mecanismo equilibrador del sistema.

Pasado el shock inicial provocado por el planteamiento de Keynes, su análisis fue interpretado de modo que pudiese ser incorporado al *corpus* central del *mainstream* neoclásico. Un primer paso fue el modelo IS-LM de Hicks que proporciona una teoría de la demanda agregada. El paso fundamental, sin embargo, corresponde a Modigliani, quien introduce el lado de la oferta de forma perfectamente neoclásica, y quien sobre esta base muestra que los resultados de Keynes se alcanzan bajo el supuesto de que el salario monetario es rígido. En la medida en que parece razonable admitir que en el corto plazo los salarios (o los precios) no son perfectamente flexibles, se llega al consenso de que la economía “keynesiana” se debe entender como una teoría referida al ajuste ante fluctuaciones en el corto plazo, mientras que en el largo plazo, en tanto que se puede considerar la perfecta flexibilidad de precios y salarios y, por lo tanto, se pueden eludir las complicaciones inherentes a los procesos de ajuste, la teoría del equilibrio general recobra su papel central o de referencia (*benchmark*) en el análisis. Este consenso no es sino la denominada síntesis neoclásica que marca, no sin fricciones, la agenda de investigación hasta la crisis de los años setenta.

La síntesis entra en crisis en la década de los años setenta por razones tanto empíricas como teóricas. De forma esquemática, por un lado, está la incapacidad de la economía “keynesiana” de explicar (incluso de acomodar) la ocurrencia conjunta de desempleo e inflación que sigue al primer shock petrolífero y, por otro, se plantea la crítica de que la economía “keynesiana” está basada en supuestos *ad hoc*, sin ningún tipo de base o de fundamentación microeconómica.

Durante la década de los años ochenta, la denominada nueva macroeconomía clásica ocupa el centro de la escena, con su propuesta de que el análisis debe estar basado en el comportamiento de agentes individuales optimizadores, que mantienen expectativas racionales (en contraposición a las expectativas adaptativas del análisis anterior) en un entorno de precios flexibles y de vaciamiento de mercados. La respuesta “keynesiana” –de la nueva economía “keynesiana”– es una agenda de investigación centrada, precisamente, en el desarrollo de fundamentos microeconómicos rigurosos para sus planteamientos esenciales.

A partir de aquí, un nuevo consenso comienza a desarrollarse: la nueva síntesis neoclásica, cuyo punto central de acuerdo es que la macroeconomía debe desarrollarse sobre fundamentos microeconómicos sólidos. En palabras de Woodford (2008, pp. 3-5): *“It is now widely agreed that macroeconomic analysis should employ models with coherent «intertemporal general equilibrium foundations». It makes it possible to analyze both short-run fluctuations and long-run growth within a single, consistent framework. [...] microeconomic and macroeconomic analysis are no longer considered to involve fundamentally different principles[...] The methodological stance of the New Classical school and the real business cycle theory has become the mainstream. But this does not mean that the Keynesian goal of structural modeling of short-run aggregate dynamics has been abandoned. Instead, it is now understood that one can construct and analyze dynamic general-equilibrium models that incorporate a variety of types of adjustment frictions, that allow these models to provide fairly realistic representations of both shorter-run and longer-run responses to economic disturbances. [...] The dynamic stochastic general equilibrium (DGSE) models now used to analyze the short-run effects of alternative policies often involve imperfect competition in both labor markets and product markets; wages and prices that remain fixed for intervals of time[...] what is important is to have general-equilibrium models in the broad sense that all equations of the model be derived from mutually consistent foundations[...]”*.

En el propio desarrollo de la primera síntesis se formula la teoría neoclásica del crecimiento debida a Solow (1956, 1957). El problema del crecimiento económico constituye el tema central alrededor del que gira el análisis de la economía política clásica. Ahora bien, con la llegada de la revolución marginalista, la cuestión del crecimiento desaparece del ámbito del análisis económico en la medida en que este se centra en el problema de la asignación estática de recursos dados. De hecho, no es hasta después de la *Teoría general* de Keynes, y como consecuencia del análisis contenido en ella, que los economistas, a partir del planteamiento original

desarrollado de modo independiente por Harrod y Domar, vuelven a prestar atención a la cuestión del crecimiento, aunque de forma mucho más limitada. Las formulaciones de Harrod y Domar constituyen un intento de extender el análisis de Keynes de la determinación del nivel de actividad económica –del nivel de empleo o del grado de utilización efectiva de los recursos– a la dinámica del sistema, es decir, a la determinación de la tasa de crecimiento (de equilibrio) de ese sistema.

La clave del análisis de Domar es la naturaleza dual de la inversión. En la *Teoría general*, Keynes solo considera la inversión en su aspecto de demanda, es decir, su naturaleza como demanda o gasto y, por lo tanto, su papel como variable fundamental y determinante, a través de la operación del multiplicador, del nivel efectivo de renta y de empleo del sistema. Ahora bien, la inversión también genera capacidad productiva, es decir, supone una adición a la capacidad existente. En efecto, el gasto de inversión en un período dado proporciona la demanda del output (en exceso del consumo) que resulta de la capacidad productiva existente, a la vez que supone un aumento de esa capacidad en períodos futuros. Así, un determinado nivel de utilización de la capacidad productiva en un determinado período exige que se lleve a cabo un cierto gasto de inversión; pero, en la medida en que este supone un aumento de la capacidad instalada, la utilización de aquella en el período siguiente requerirá un mayor nivel de inversión. En otras palabras, si la inversión en un período asegura la utilización de la capacidad productiva, da lugar, a su vez, a un exceso de capacidad en el período siguiente, a no ser que el gasto de inversión aumente en proporción adecuada; por lo tanto, el mantenimiento a lo largo del tiempo del grado de utilización de la capacidad productiva requiere un gasto de inversión continuamente creciente. Inmediatamente surge la cuestión de cuál *debe ser* la tasa de crecimiento de la inversión si el nivel de utilización de la capacidad productiva se ha de mantener en el tiempo; la respuesta a este problema da lugar a la noción bien conocida de tasa de crecimiento garantizada, determinada por el cociente entre la tasa de ahorro y la ratio capital-output.

El análisis de Domar se mueve estrictamente al nivel de la consistencia lógica –de las condiciones de consistencia– de la dinámica del sistema, es decir, se refiere estrictamente a la existencia de una tasa que asegure el crecimiento sostenido de este. A este respecto, Harrod establece una distinción entre la tasa real o efectiva de crecimiento y la tasa garantizada, y sobre esta base desarrolla su análisis del equilibrio dinámico del sistema, y en particular su formulación de la inestabilidad intrínseca de la senda de crecimiento de equilibrio. Si ambas tasas son iguales, es decir, si la tasa efectiva de crecimiento es igual a la tasa garantizada, de modo que los empresarios “están satisfechos con lo que están haciendo” y, por lo tanto, están dispuestos a mantener el mismo comportamiento y a “continuar la misma línea de progreso”, el sistema se mantendrá en equilibrio dinámico en tanto en cuanto no se produzca ningún cambio en las circunstancias que lo determinan. Ahora bien, ese equilibrio es intrínsecamente inestable; esta inestabilidad dinámica constituye el

problema bien conocido del “filo de la navaja” (*knife-edge problem*) –“primer problema de Harrod”–, según el cual la senda de equilibrio es como el “filo de una navaja”: si el sistema se encuentra en esa senda –si está en equilibrio dinámico–, continuará creciendo a través de ella en tanto que no tenga lugar ningún cambio que lo perturbe; sin embargo, cualquier desviación a ambos lados de la senda de equilibrio se ampliará progresivamente, de modo que el sistema se alejará cada vez más de ella.

Ahora bien, el hecho de que el sistema crezca a lo largo de la senda de equilibrio –de que la tasa efectiva de crecimiento coincida con la tasa garantizada– no significa que se consiga el pleno empleo del trabajo. En un sistema en equilibrio dinámico, el nivel de empleo (o desempleo) del trabajo depende de la tasa natural de crecimiento, dada exógenamente por la tasa de crecimiento de la población y por la tasa de progreso técnico, así como de su relación con la tasa garantizada. Así, el equilibrio dinámico será de pleno empleo si y solo si la tasa garantizada es igual a la tasa natural. Además, si ambas tasas difieren, en la medida en que están determinadas por factores diferentes, los cuales se consideran dados, no existe ningún mecanismo en el sistema que pueda conseguir la igualdad entre ellas; en este sentido, no se puede mostrar que en el equilibrio dinámico del sistema se dé una tendencia al pleno empleo del trabajo. Es, precisamente, a este problema –“segundo problema de Harrod”–, es decir, a la posible divergencia entre la tasa natural y la tasa garantizada de crecimiento, a la falta de un mecanismo que asegure su igualdad y, por lo tanto, a la posibilidad de que el equilibrio dinámico del sistema se caracterice por la existencia de desempleo, al que se dirigen los modelos neoclásico y keynesiano de crecimiento. De hecho, el problema de la inestabilidad del equilibrio ha sido en general totalmente relegado en la literatura sobre el crecimiento económico.

La solución neoclásica al segundo problema de Harrod, formulada inicialmente por Solow (1956, pp. 65-94)¹⁵, descansa en la posibilidad de sustitución entre los factores capital y trabajo. De acuerdo con Solow, el problema de Harrod se deriva directamente de la total inflexibilidad en términos de la elección de técnicas impuesta en el análisis como consecuencia de suponer una función de producción de coeficientes fijos. El modelo de Solow se centra exclusivamente en el lado de la oferta. Su análisis –y en general el análisis neoclásico del crecimiento– se basa en el supuesto de que el output no consumido es inmediatamente ahorrado e invertido (Solow, 1956, p. 66). A este respecto, se puede afirmar que el análisis neoclásico está basado en la “identidad de Say” en el sentido (clásico) de que el “ahorro es inversión”. Como señala Sen (1970, pp. 23-24), el análisis neoclásico se suele interpretar de dos formas: “una primera interpretación es suponer que la inversión «ex-ante» y el ahorro «ex-ante» se igualan a través de la planificación y de la inter-

¹⁵ Junto con Solow, se suele considerar a Swan y a Meade como precursores de la teoría neoclásica del crecimiento. A este respecto, véase Swan (1956, pp. 334-361) y Meade (1961).

vención del gobierno¹⁶. Otra interpretación es considerar el modelo como una descripción de las consecuencias en el tiempo de mantener el pleno empleo y no como un modelo causal de lo que realmente ocurre. En esta interpretación, el objetivo del modelo Solow-Swan sería investigar la senda de pleno empleo y no describir lo que de hecho ocurriría en una economía capitalista con o sin control. Esto es menos heroico y menos criticable”.

Sobre esto, en nota a pie de página, Sen (1970, p. 24) señala que: “el propio Solow prefiere esta interpretación. En una nota a este autor, Solow escribe: esto me parece más descriptivo que hablar de la ausencia de una función de inversión. Esto es cierto. Pero la idea es investigar sendas de pleno empleo, no más”.

Y continúa Sen (1970, p. 24): “cito esta nota porque no estoy seguro de que esto esté suficientemente claro en el artículo de Solow, y cualquier lector podría sacar la impresión opuesta, especialmente de la «Introducción». Ciertamente, en la amplia literatura a la que el artículo de Solow ha dado lugar, se le ha atribuido mucho más que simplemente investigar sendas de equilibrio”.

En el modelo neoclásico, ante una divergencia entre la tasa garantizada y la tasa natural de crecimiento, el peso del ajuste recae sobre la tasa garantizada, y en particular sobre la relación capital-producto. De acuerdo con esta interpretación, en el modelo de Harrod, dado que está basado en una función de producción de coeficientes fijos, el sistema de precios, y en especial los precios (relativos) de los factores –su remuneración real–, no desempeña papel alguno en el análisis. Sin embargo, una vez que se considera una función de producción de tipo general, caracterizada por la posibilidad de sustitución (continua) entre los factores de producción –entre el capital y el trabajo–, se hace necesario considerar los cambios que se producen en el método de producción, es decir, en la intensidad de uso de los factores, en la relación capital-trabajo y, por lo tanto, en la relación capital-producto, ante las variaciones del precio relativo de estos –tipo de interés *versus* tasa de salario real¹⁷–. Nótese a este respecto que las tasas garantizada y natural se pueden considerar como las tasas de crecimiento de la demanda y de la oferta de trabajo, respectivamente. Como argumenta Solow (1956, pp. 67-68) en relación con la expresión del crecimiento de la fuerza de trabajo $L(t) = L_0 e^{+nt}$, que cierra su modelo, esta se puede considerar “[...] como una curva de oferta de trabajo, la cual indica que una mano de obra que crece exponencialmente se ofrece para su empleo de forma totalmente inelástica. La curva de oferta de trabajo es una línea vertical que se desplaza a la derecha a lo largo del tiempo a medida que la fuerza de trabajo crece de acuerdo con la expresión anterior. Entonces, la tasa de salario se ajusta de modo que todo el trabajo disponible se encuentre empleado, y la ecuación de productivi-

¹⁶ A este respecto, Sen, en nota a pie de página, cita a Swan, quien supone que “o bien las autoridades leyeron la Teoría general o bien son socialistas que no necesitan hacerlo”.

¹⁷ La remuneración real de los factores capital y trabajo –tipo de beneficio o interés (tasa de alquiler real “rental rate” de los servicios del capital) y tasa de salario real– se supone dada por las respectivas productividades marginales.

dad marginal determina la tasa de salario que regirá en cada momento. [...] también está implicado un supuesto de pleno empleo del stock de capital disponible. En todo momento del tiempo, el stock de capital preexistente (resultado de la acumulación anterior) se ofrece inelásticamente. Así, existe una ecuación similar de productividad marginal para el capital, la cual determina el alquiler real por unidad de tiempo de los servicios del stock de capital”.

De hecho, el análisis descansa en la (supuesta) existencia de una ordenación perfecta de las técnicas de producción, en el sentido específico de que existe una relación inversa bien comportada entre la intensidad en el uso de los factores y el precio relativo de estos (tipo de interés/tasa de salario real). Sobre esta base, el modelo muestra que, dada la tasa natural de crecimiento, siempre existe un método de producción para el cual la tasa garantizada es igual a la natural. Como argumentan Hahn y Matthews (1967, p. 11): “*lo que el argumento neoclásico significa es que cualquier tendencia del stock de capital a crecer más o menos rápidamente supone que la [fuerza de trabajo] se puede eludir eligiendo un método de producción con una intensidad de capital apropiada. [...] La tasa de crecimiento de equilibrio es la tasa natural, y el problema de Harrod de la divergencia entre la tasa garantizada y la tasa natural se evita haciendo la tasa garantizada s/v una variable, debido a la flexibilidad de v , en vez de una constante”.* O, como el propio Solow (1956, p. 68) establece, el proceso de crecimiento se puede entender de la siguiente forma: “*en cualquier momento, la fuerza de trabajo disponible está dada por la ecuación $L(t) = L_0 e^{+nt}$ y el stock de capital disponible también es un dato. Como la remuneración real de los factores se ajusta de tal modo que se consiga el pleno empleo del trabajo y del capital, se puede usar la función de producción para obtener la cantidad de producto en cada momento; [...] la propensión a ahorrar nos da la parte del producto neto que será ahorrada e invertida. De este modo, conocemos la acumulación neta de capital en el período y añadiéndola al stock de capital ya acumulado obtenemos el capital disponible para el período siguiente, y todo el proceso puede ser repetido”.*

Así, si la tasa garantizada excede a la tasa natural se produce una escasez de fuerza de trabajo, de tal modo que la tasa de salario aumenta; el encarecimiento del trabajo (relativo al capital) induce la elección de técnicas más intensivas en capital, lo que supone que la intensidad de uso del capital (capital por unidad de trabajo) y la razón capital-producto aumentan; en consecuencia, la tasa garantizada de crecimiento disminuye progresivamente hasta que se iguala a la tasa natural dada.

El caso en el que la tasa garantizada es inferior a la tasa natural es perfectamente simétrico. A este respecto, podemos suponer que el sistema se encuentra inicialmente en equilibrio y que la tasa natural aumenta como consecuencia del progreso técnico¹⁸, de modo que la tasa garantizada es ahora menor que la nueva tasa natu-

¹⁸ En presencia de progreso técnico, la tasa natural de crecimiento está dada por la suma de la tasa de crecimiento de la fuerza de trabajo y la tasa de progreso técnico (crecimiento de la productividad).

ral. En esta situación se produce un exceso de fuerza de trabajo (una tendencia al desempleo de esta)¹⁹ y, en consecuencia, la tasa de salario cae; el abaratamiento del trabajo (relativo al capital) conduce a la elección de técnicas con una mayor intensidad de uso del factor trabajo, es decir, caracterizadas por una relación capital-trabajo (y capital-producto) menor. Así, en esta situación las relaciones capital-trabajo y capital-producto disminuyen y, por lo tanto, la tasa garantizada aumenta hasta que, finalmente, se iguala al nuevo valor de la tasa natural, de tal modo que el sistema alcanza un nuevo equilibrio dinámico de pleno empleo para una mayor tasa de crecimiento.

Como se puede inferir de la síntesis anterior, en el ámbito de la teoría neoclásica del crecimiento, y como consecuencia fundamentalmente del supuesto de rendimientos decrecientes a la acumulación de capital (y de la propia exogeneidad de la tasa natural), la tasa de crecimiento de equilibrio es independiente de la tasa de ahorro (inversión). En particular, la tasa de crecimiento del output por unidad de trabajo depende únicamente de la tasa de progreso técnico, la cual se considera dada exógenamente.

En la misma línea conceptual que el modelo básico que acabamos de exponer, Solow (1957) desarrolla la metodología de la contabilidad del crecimiento (*growth accounting*), cuyo objeto es separar aquella parte del crecimiento del producto (renta) total que se debe al progreso técnico –la contribución del progreso técnico al crecimiento– de aquella que resulta del crecimiento de los factores productivos –la contribución al crecimiento del capital y del trabajo–. Como señala Solow, el término progreso técnico se utiliza aquí como una expresión reducida de cualquier causa que dé lugar a un desplazamiento de la función de producción. Así, la separación de la contribución al crecimiento del output de los factores capital y trabajo, por un lado, y del progreso técnico, por otro, es equivalente a la descomposición de las variaciones del output total en “movimientos a lo largo de la función de producción” y en “desplazamientos de la propia función”.

En el análisis, el crecimiento del output se descompone de forma aditiva en el crecimiento en un determinado período de los factores capital y trabajo, ponderados por sus participaciones en el producto (renta) total, y en la contribución del progreso técnico. Así, dado el crecimiento del producto total en ese período, esta última contribución –como, a menudo se expresa, la contribución del crecimiento de la productividad total de los factores (*total factor productivity*)– al crecimiento del output se puede estimar como *residuo*. En particular, en su análisis de la economía americana en el período 1909-1949, Solow encuentra una contribución del progreso técnico de un 90%.

Los resultados de Solow provocaron bastante inquietud en el ámbito del enfoque neoclásico. Dada la concepción implicada del término de progreso técnico co-

¹⁹ Nótese que un aumento de la tasa de progreso técnico es igual, en sus efectos, a un mayor crecimiento de la fuerza de trabajo; de hecho, supone un aumento de la oferta de trabajo “efectiva” –de la fuerza de trabajo en “unidades de eficiencia”–.

mo un factor exógeno del que no se proporciona explicación alguna, y con independencia de que se contemple como representación de aquellos factores (no identificados) que puedan dar lugar a un desplazamiento de la función de producción o de que, de hecho, se considere como representación del progreso técnico en sentido estricto, los resultados de Solow suponen que en dicho ámbito el crecimiento económico permanece totalmente inexplicado²⁰.

A partir de esta aportación, se desarrolla una amplia literatura centrada en la contabilidad del crecimiento, cuyo objetivo en general es, precisamente, reducir el residuo. Así, por ejemplo, se intenta desagregar el capital en términos tanto de los diversos elementos que lo componen como de las diferentes generaciones en uso; a su vez, el trabajo se descompone de acuerdo con su estructura de cualificaciones y de su composición en términos de edad, sexo, etc. En todo caso, la concepción fundamental de la contabilidad del crecimiento, intrínseca al propio modelo neoclásico, se mantiene básicamente inalterada. En este sentido, se puede afirmar que, aparte de identificar ciertos elementos que previamente formaban parte del residuo, las extensiones del trabajo de Solow no suponen sino un mero cambio en la forma de contabilización.

Después de un cierto letargo en el tiempo, a partir de los años ochenta la teoría del crecimiento experimenta un renacimiento que se materializa en la denominada nueva teoría del crecimiento o teoría del crecimiento endógeno. Quizás, una de las principales motivaciones de este renovado interés en la cuestión del crecimiento reside en la falta de una convergencia real de renta entre países, pero también, desde luego, y desde un punto de vista interno al propio análisis, en la falta de satisfacción que supone no disponer de una explicación coherente de las fuentes del progreso técnico y de la contribución de este al proceso de crecimiento económico.

En términos de su estructura básica, la nueva teoría se mantiene dentro del marco analítico del enfoque neoclásico y, en este sentido, se propone integrar resultados derivados de los análisis microeconómicos del progreso técnico, que en muchos casos pueden suponer la consideración de fallos de mercado y de situaciones de competencia imperfecta. Desde una perspectiva más concreta y, a la vez, más próxima al propio desarrollo de los modelos de crecimiento, parece que la gran motivación de este nuevo interés es considerar la tasa de progreso técnico (de crecimiento de la productividad) como endógena y, más concretamente, como determinada por las decisiones de ahorro (inversión) de los agentes económicos. Los modelos que normalmente se considera que abren el camino del desarrollo de esta nueva teoría son los de Romer (1986) y Lucas (1988), aunque ambos deben considerarse deudores de los trabajos de Arrow (1962) y Uzawa (1965). El elemento común de estos dos modelos reside en la presencia de externalidades. En el modelo de Romer se considera explícitamente la inversión de las empresas en investigación

²⁰ En este sentido, la medida de la contribución del "progreso técnico" se vino a considerar como una "medida de nuestra ignorancia".

y desarrollo (I+D), cuyos resultados pasan a formar parte del stock común de conocimiento; en definitiva, el crecimiento de la productividad resulta de los derrames (*spillovers*) del esfuerzo privado en I+D. Por su parte, en el modelo de Lucas, la inversión de los agentes individuales se materializa en la formación de capital humano; en este caso, el crecimiento de la productividad se deriva de los derrames que resultan de la acumulación de capital humano²¹.

Después de este breve excursus por el desarrollo del *mainstream* de la economía, que no pretende en ningún caso ser exhaustivo, no cabe duda de que estamos ante un formalismo de una gran potencia simbólica, de una enorme capacidad de sugestión y aún de seducción. Mediante un conjunto relativamente acotado de suposiciones aparentemente adecuadas a la naturaleza de los agentes económicos, es capaz de predecir la existencia de una situación ideal en la que cualquier incentivo para el cambio se ha neutralizado alcanzándose el óptimo de todos los agentes implicados en la economía. Es difícil imaginar un formalismo más prometedor y apetecible, cualidades que, junto con su naturaleza matemática que aparenta permitir la predicción, pueden explicar su éxito en la historia del pensamiento económico. No obstante, a lo largo de su casi siglo y medio de existencia ha tenido que hacer frente a fuertes controversias y ataques, así como a importantes retos.

Desde la perspectiva de esta contribución, queremos destacar las dificultades del formalismo neoclásico para dar cuenta de la existencia de organización y de estructura en la economía, y del carácter inherentemente evolutivo de estas. Nuestra tesis es que únicamente mediante la integración de los avances de la física contemporánea (termodinámica no lineal, física de sistemas complejos...) puede acometerse adecuadamente esta tarea. A este respecto, y hasta donde sabemos, escaso esfuerzo se ha dedicado a la conciliación del formalismo neoclásico con la termodinámica, probablemente porque en esencia ambos formalismos resultan incompatibles.

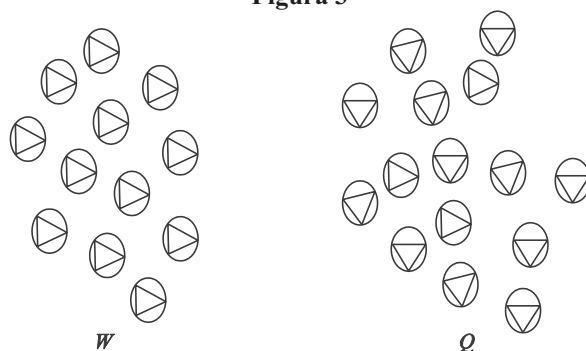
Desde siempre ha existido una necesidad de principios de conservación en el marco del formalismo neoclásico, una cantidad que pasa de una forma a otra, de materias primas a utilidad pasando por dinero, en lo que es una suerte de conservación de la energía en el sentido en el que la establece la primera ley de la termodinámica, en la que se recoge la equivalencia de calor y trabajo en lo que respecta a variación de la energía del sistema, $\Delta U = Q + W$. Ahora bien, una de las consecuencias de la segunda ley de la termodinámica es que esa equivalencia entre calor y trabajo mecánico solo es aparente, pues la interconvertibilidad de una en la otra es unidireccional: el trabajo puede ser convertido en calor íntegramente, pero el calor no puede convertirse íntegramente en trabajo²². Y ello es así porque el trabajo

²¹ Con posterioridad a la obra de estos autores se ha desarrollado una amplia literatura en el campo cuyo resumen excede con mucho el ámbito de este trabajo.

²² No es, por lo tanto, posible un móvil perpetuo de segunda especie que se mantenga en la producción de trabajo únicamente mediante la absorción de calor de un foco.

mecánico es un fenómeno macroscópico asociado al movimiento molecular ordenado, mientras que el calor es movimiento molecular desordenado (figura 3). Se establece así una ordenación en el espacio de estados que son accesibles de manera espontánea por el sistema, estando vedados todos aquellos que supongan un incremento del orden en el sistema de manera espontánea, i.e. una disminución de la entropía, sin pagar un precio por ello.

Figura 3



Esta es la esencia última de la segunda ley, que establece una restricción a los procesos que, a pesar de conservar la energía, son espontáneamente observables. Además, desde la segunda ley de la termodinámica es fácil de interpretar el hecho de que todos los procesos cronológicos sean irreversibles: en ellos se produce intercambio de energía en forma desordenada de una u otra manera, esto es, crecimiento de entropía. Salvo en los hipotéticos procesos mecánicos adiabáticos, en todos los procesos reales se pierde de manera irreversible información acerca del estado mecánico microscópico de sus constituyentes, por lo que los estados intermedios entre los estados terminales de equilibrio no pueden etiquetarse mediante un reducido número de variables termodinámicas. Los procesos reversibles solo son una aproximación útil y conveniente para analizar procesos que involucran estados terminales de equilibrio, y en los que la evolución en sí no es objeto de interés.

Las profundísimas implicaciones que tiene esta ley están mucho más allá del ámbito de este trabajo. Para nuestros propósitos basta con señalar que la recepción de este principio en el ámbito del formalismo neoclásico de equilibrio general, si acaso posible, sería extremadamente complicada²³. De hecho, no ha sido objeto de una integración adecuada hasta la fecha. En palabras de M. Shahid Alam (2005, p.

²³ Hay que destacar en este sentido que Walras no estaba familiarizado con el formalismo termodinámico, en particular con las implicaciones de la segunda ley. No es este, desde luego, el caso de Fisher, para quien la identidad de su director de tesis nos garantiza el acceso a estos conocimientos. De acuerdo con Foster (1993), Jevons trató de aplicar el concepto de entropía en su obra *The Coal Question* (1865), aunque con escaso éxito. Nuevamente, según Foster, Marshall, consciente de las dificultades de Jevons de aplicar el concepto de entropía, y con él la segunda ley de la termodinámica, simplemente lo ignoró en sus *Principles*.

2), de la Northeastern University de Boston: “[neoclassical economist’s account of the economy] fails to come to terms with the contribution of energy to the economy. Few economists have worried about this omission. Among economists, Nicholas Georgescu-Roegen [...] stands nearly alone in taking economics to task for this omission. He pointed out that Marxists and neoclassical economists abstract from nature; they take resources and energy flows for granted and ignore the economy’s output of wastes. This not only produces mechanistic models of the economy, in which economic processes are reversible, but it ignores the implications of entropy for economic activity and growth. Standard economics, Georgescu-Roegen [...] argues, ignores the fact that terrestrial resources of energy and materials are irrevocably used up and the harmful effects of pollution on the environment accumulate. «The economists» optimism about the endless possibilities of growth is based on this truncated world view that shuts out nature from its calculus”.

Y todo ello a pesar de que, parafraseando a Von Clausewitz, podríamos decir que la economía no es sino una continuación de la termodinámica por otros medios. Toda la actividad económica debe estar, como no puede ser de otro modo, sometida a las leyes de la física. Es sencillo comprender que todos los procesos asociados a la producción estén de hecho sometidos a aquellas, pues su carácter material y físico es indiscutible. Pero también lo están los procesos de crecimiento económico, que implican el desarrollo de las estructuras económicas y aún la creación de otras nuevas. Y el propio intercambio no puede estar, en nuestra opinión, al margen de las leyes termodinámicas, aunque estas adopten una forma peculiar en este ámbito óptico.

El trabajo pionero en la recepción de la segunda ley de la termodinámica en el formalismo económico fue el de Nicolas Georgescu-Roegen en su ya clásico *The Entropy Law and the Economic Process* (1971), en el que se interroga acerca del papel de la entropía en el proceso económico. Para él, la segunda ley es la explicación última de la escasez económica, y la entropía en un sistema económico cerrado debe alcanzar un máximo exactamente igual que en el caso de cualquier otro sistema termodinámico, lo que permitía introducir de manera natural la irreversibilidad en el proceso económico, ya presente incluso en la obra de Marshall (Foster, 1993). Para Georgescu-Roegen (Foster, 1993, p. 983), “...thermodynamics is at bottom a physics of economic value –as Carnot unwittingly set it going– and the Entropy Law is the most economic in nature of all natural laws”. “[...] the Entropy Law is the taproot of economic scarcity”.

Naturalmente, una vez introducida la entropía en el formalismo, todo el edificio neoclásico muestra sus debilidades, ocultas tras su esplendorosa apariencia (Foster, 1993, p. 983): “The economics of entropy also, of course, applies in the economic domain-economic structures are created with low entropy characteristics, they are used in an economizing manner through time and they are scrapped when the opportunity cost of maintaining them becomes too high. Thus, in Georgescu-Roegen’s view, Marshall’s economics is a necessary consequence of the existence

of the entropy law and cannot be intelligible from any other perspective. In particular, he emphasizes that Marshall's economics makes no sense at all in a static neoclassical framework of perpetual motion machines”.

En este párrafo de Foster están condensadas algunas de las implicaciones más formidables de la segunda ley en lo que al proceso económico se refiere: a) el hecho de que en sistemas abiertos se forman organizaciones económicas; b) que toda organización sea una forma de disposición de recursos de baja entropía; y c) que esté condenada a su desorganización cuando no sea posible mantener los flujos adecuados para su sostenimiento. Todo esto es, desde luego, incomprensible en el marco del pensamiento neoclásico, en el que todas las estructuras están dadas con anterioridad al proceso económico, son inmutables y no degradan energía (por lo que sería posible un *perpetuum mobile* de segunda especie). Una economía es un sistema con muchos agentes, por lo que su naturaleza debe estar más próxima a la de un sistema termodinámico que a la de un sistema puramente mecánico. La segunda ley puede ayudarnos a entender movimientos en el espacio económico que serían difíciles de comprender en ausencia de este concepto. Así, aunque en las inmediaciones de nuestro estado tengamos otros de baja entropía accesibles, el sistema simplemente evolucionará hacia los de mayor entropía de manera espontánea, pues estos son –de acuerdo con el principio de Boltzmann– mucho más numerosos y, por lo tanto, más probables. Por ello, el mecanismo de exploración de nuevos estados, las fluctuaciones microscópicas de los agentes que componen el sistema, conducen hacia situaciones de mayor desorden de manera espontánea.

Con posterioridad a la obra de Georgescu-Roegen, se han producido diferentes aplicaciones del concepto de entropía y de la segunda ley de la termodinámica en el ámbito de la economía. Destacaremos el trabajo de E.T. Jaynes (1991), en el que se conjetura acerca de que la dirección del cambio económico se debe a las entropías de los estados vecinos a uno dado tanto como a cualquier otro factor dinámico subyacente.

Asimismo, merece mención la formulación de una equivalencia explícita entre la economía y la termodinámica de equilibrio debida a Wayne Saslow (1999), en la que también se realiza una conexión con la mecánica estadística mediante la reinterpretación del volumen fásico en el espacio de estados (i.e. el número de microestados accesibles a un determinado sistema físico) en términos del grado de diversidad económica.

Dentro de las aplicaciones de la termodinámica clásica de equilibrio al proceso económico, también merece mencionarse el trabajo de E. Smith y D. Foley (2008), en el que los autores demuestran que la economía en las que todos los agentes tienen preferencias cuasilineales en algún bien tienen una estructura de intercambio (*trading-constraint structure*) equivalente a la estructura de sistemas físicos con ecuaciones de estado de la termodinámica clásica, proporcionando además equivalentes económicos para magnitudes y potenciales termodinámicos, incluyendo la temperatura y la entropía.

También se han registrado intentos de aplicar la termodinámica de procesos irreversibles en la región lineal al estudio de procesos económicos, entre los que citaremos los trabajos de Nuwayhid *et al.* (2006), que analiza los flujos difusivos de mercancías en la economía, o de Tsirlin *et al.* (2003), quienes prueban que la economía y la termodinámica pueden dividirse en clases de procesos equivalentes con tipos comunes de procesos de disipación mínima, además de formular una analogía entre la disipación de capital y la entropía. Hasta la fecha, no conocemos ninguna aplicación de la termodinámica no lineal al estudio de procesos económicos, aspecto sobre el que volveremos en lo sucesivo.

En suma, el *core* fundamental de la teoría económica contemporánea (teoría neoclásica de equilibrio general) sigue aferrado a un formalismo extremo derivado de la mecánica del siglo XIX –y excluyendo la termodinámica–, que considera la economía como un sistema cerrado, dominado por un campo de utilidad y en el que rige un principio de conservación de la cantidad total de utilidad disponible, y una idea de existencia de equilibrio final aún en condiciones de crecimiento. Es un marco teórico basado en hipótesis sobre el comportamiento de agentes independientes (salvo cuando se reúnen en las subastas) como el inmediato acceso a la información del campo de precios, su procesamiento en términos de racionalidad perfecta²⁴, y la existencia de competencia también perfecta en los mercados y de rendimientos decrecientes. Todo ello permite llegar al óptimo de Pareto que representa el equilibrio general. Todas las modificaciones que se han introducido en este núcleo formal –racionalidad limitada, competencia imperfecta, asimetrías de información e información limitada, externalidades medioambientales que tratan de integrar el problema entrópico subyacente–, en palabras de Beinhocker, “*were indeed variations on a theme rather than new symphonies themselves*”.

Estamos ahora en posición de responder a la pregunta que nos formularmos al comienzo de esta sección sobre si esta simplificación que representa la denominada síntesis neoclásica es o no excesiva, dada la naturaleza del sistema económico. Y respondemos que, en nuestra opinión, se trata de una hipersimplificación de-terminista y reduccionista en su concepción, que ignora rasgos esenciales de la economía y que supone comportamientos irreales de los agentes económicos en aras de la simplicidad matemática, en ausencia –y, a veces, incluso en contra– de la evidencia empírica, hasta el punto en que no es posible considerarlo un modelo válido (por no realista) para aproximarse a la realidad económica. Y en este punto, formulada la crítica, debemos pronunciarnos acerca de por qué esta teoría –utilizada de manera generalizada por agentes e instituciones económicas– es capaz de interpretar de manera parcialmente correcta aspectos de la realidad económica. ¿Se trata de un modelo límite que, en promedio, captura de forma aproximada la rea-

²⁴ La racionalidad limitada (*bounded rationality*) de Herbert Simon ha tenido escasa recepción dentro del formalismo neoclásico de equilibrio general.

lidad económica a la manera en que la mecánica clásica lo hace con una realidad intrínsecamente cuántica? En mecánica clásica el estado mecánico de la partícula móvil (su posición y velocidad o momento) parece ser completamente describable sin más limitación que la incertidumbre de medida, a diferencia de lo que sucede cuando el móvil es microscópico, cuando rige el principio de incertidumbre que prohíbe de manera definitiva el acceso simultáneo a esos observables. No obstante, a medida que se aumenta el tamaño del sistema o los números cuánticos, los efectos cuánticos van desapareciendo y se recupera el formalismo clásico en lo que se denomina principio de correspondencia. ¿Sucedre algo semejante en la economía?, ¿es la teoría neoclásica el límite de algún formalismo aún desconocido y que tenga una mejor base empírica?, ¿o es que toma por definición la realidad como resultado del modelo? En ausencia de una respuesta plenamente satisfactoria a estas preguntas, y con el trasfondo de las escalas temporales²⁵, en nuestra opinión, el formalismo neoclásico –de cuya contribución al desarrollo de la economía, como ya hemos dicho anteriormente, no dudamos– debe realizar el mismo proceso que la física en la que se inspiró en el siglo XIX, y que describimos en la sección anterior, y llegar a un modelo realista capaz de integrar los rasgos esenciales del sistema económico que trata de describir: un sistema complejo autoadaptativo.

Para ello, entre otras cosas, tiene que incluir en su formalismo el equivalente a la termodinámica en física, con un concepto claro de la disipación en el proceso económico y de la irreversibilidad consecuente de los procesos, y con una analogía clara de la entropía. Debe también mejorar en la modelización del agente económico en su microescala, lo que vendría a ser el análogo de la revolución cuántica en la física. Ha de integrar, igualmente, el formalismo diseñado para la descripción de fenómenos críticos, que le permita comprender las emergencias en fenómenos cooperativos que se dan en diversos ámbitos de la economía, como el comportamiento de los mercados financieros o los procesos de difusión tecnológica. Asimismo, debe importar las herramientas formales de descripción de las interacciones reales (metaeconómicas, podríamos decir) que existen entre los agentes económicos, auténticas redes complejas de transmisión de información que determinan de manera crucial su conducta, y que dan lugar a patrones espacio-temporales en la economía. Y finalmente, debe matizar la idea de equilibrio y mantenerse a distancia de ese equilibrio para poder explicar la aparición y la evolución espacio-temporal de las estructuras económicas a la manera de la termodinámica no lineal. La realización de este magno programa de cambio paradigmático es una de las principales direcciones de investigación de la economía contemporánea, y la orientación que preconiza el conjunto de autores que lo realizan recibe el nombre de economía de la complejidad. A ellas dedicamos la siguiente sección.

²⁵ Estamos persuadidos de que la observación de equilibrio en el sistema es una cuestión de la escala temporal de observación.

4. ECONOMÍA DE LA COMPLEJIDAD: EMERGENCIA Y AUTOORGANIZACIÓN A PARTIR DEL AZAR

Es una verdad bien asentada en termodinámica que cuando un sistema alcanza el equilibrio termodinámico con su entorno alcanza su muerte termodinámica, pues en aquella situación ya no es posible la producción de trabajo alguno. No obstante, como vimos, su existencia –y aún su presencia continuada– es el hecho central de la teoría neoclásica convencional. Evidentemente, estamos ante una conclusión que se basa en la hipótesis errónea de sistema cerrado de equilibrio, que ignora la realidad económica empírica en la que todo es evolución, cambio, creación permanente.

Como ha quedado demostrado, este orden de cosas se ha producido por el afán de disponer de una descripción matemática determinista y reduccionista de la economía, hecha a imagen y semejanza de la física decimonónica. No obstante, en la economía contemporánea se están produciendo cambios que van en la dirección antes apuntada de analizar la economía desde una perspectiva no reduccionista. Como dirá Brian Arthur en su ya clásico artículo “Complexity and the Economy” (Arthur, 1999, p. 107): *“After two centuries of studying equilibria static patterns that call for no further behavioral adjustments economists are beginning to study the general emergence of structures and the unfolding of patterns in the economy. When viewed in out-of-equilibrium formation, economic patterns sometimes simplify into the simple static equilibria of standard economics. More often they are ever changing, showing perpetually novel behavior and emergent phenomena. Complexity portrays the economy not as deterministic, predictable, and mechanistic, but as process dependent, organic, and always evolving”*.

La economía como manifestación de la sociedad humana es el resultado de una complejísima trama de relaciones de producción, de distribución e intercambio, resultado del intrínseco dinamismo de los agentes económicos. Hereda la estructura y la organización de la sociedad que la subyace como matriz material sobre la que se asienta, y es así un sistema complejo jerárquicamente organizado de agentes que están interconectados entre sí por múltiples causas (familiares, de amistad, de vecindad, de trabajo...) no únicamente económicas, entre los que se establecen relaciones de subordinación, colaboración e intercambio. Desde un punto de vista termodinámico, se trata de un sistema abierto, espacialmente inhomogéneo, en el que complejos flujos de energía, materia, capital, trabajo e información se establecen tanto en el interior de los diferentes subsistemas económicos como con su exterior. Mediante ellos se mantiene de manera permanente en una situación muy alejada de su equilibrio para poder preservar su autoorganización estructural (corporaciones, Estado, redes de transporte, redes de información...) en el tiempo y en el espacio, a partir únicamente de las fluctuaciones libres de sus constituyentes. Todo ello es necesario para poder producir las transformaciones que observamos empíricamente adaptándose a una realidad permanentemente cambiante.

La integración de todos estos rasgos en el formalismo económico es una exigencia científica básica, pues la tarea de la ciencia es la descripción y el control de la realidad con base en formalismos elaborados a partir de las características del objeto de estudio, y que permitan predecir sus propiedades y comportamiento. La ciencia de la complejidad –o mejor, las ciencias de la complejidad– ofrece el marco perfecto para el desarrollo de este programa de investigación científica. Lo que en la actualidad denominamos “ciencias de la complejidad” es un *corpus* de saberes y disciplinas marcadamente interdisciplinar que se ha desarrollado esencialmente desde mediados del siglo pasado y que comprende desde la física hasta la propia filosofía, pasando por la biología, la economía, la cibernética..., que se enfrentan a la necesidad de implementar técnicas y métodos para la comprensión de los denominados sistemas complejos, que son aquellos en los que no es posible separar partes sin perder alguna propiedad del conjunto no presente en las partes (emergente). A ellos, y a su papel central en la ciencia contemporánea, pasamos a dirigir nuestra atención.

Recordamos que en el paradigma reduccionista de la física clásica –en la que se desarrolló el actual *mainstream* económico– la separabilidad de los sistemas de su entorno y su simplicidad eran características esenciales. No obstante, la termodinámica ya mostraba indicios de que esa separabilidad no era tan absoluta como podía parecer, y enseguida quedó patente que el tratamiento científico de los sistemas vivos no encajaba en el ámbito del principio de superposición. A medida que la actividad de la física fue acometiendo el estudio de fenómenos como los fenómenos críticos en sistemas de muchos cuerpos –en los que emerge una propiedad colectiva no presente en sus constituyentes, como el ferromagnetismo, o las condensaciones de Bose-Einstein tales como la superconductividad o la superfluidez, que no están ciertamente presentes en ninguno de los átomos o moléculas del sistema– ha ido quedando de manifiesto que el paradigma reduccionista no es suficiente ni siquiera en el marco de la propia física. Así lo expone el Premio Nobel de Física (y autor de la denominación de física de la materia condensada) Phil Anderson en su famoso artículo “More is Different” (Anderson, 1972, p. 393): “*The main fallacy in this kind of thinking is that the reductionist hypothesis does not by any means imply a «constructionist» one. The ability to reduce everything to simple fundamental laws does not imply the ability to start from those laws and reconstruct the universe*”.

Por supuesto, lo mismo puede aplicarse a los núcleos, los átomos o las moléculas, en las que ninguno de sus constituyentes tiene las propiedades de la estructura final. Lógicamente, esto también era perfectamente conocido en el ámbito de la biología desde el comienzo mismo de la disciplina, ya que ni órganos ni organismos admiten desmembramiento sin perder de manera radical y definitiva sus propiedades, ni son reductibles a la información genética en el núcleo de sus células. Por supuesto, el discurso tampoco es reductible a la suma de palabras, ni el cerebro a sus neuronas. Nuestras estructuras (ciudades, redes de comunicación, mercados) no están presentes en ninguno de nosotros por separado, sino que presentan sus

propias propiedades emergentes que, como buenas estructuras disipativas, resultan de nuestras incesantes fluctuaciones.

Aunque es una categoría todavía deficientemente caracterizada, los sistemas complejos, que constituyen un objeto de estudio cada vez más frecuente de la ciencia contemporánea e incluso de la filosofía (Rescher, 1988; Morin, 2006), se definen convencionalmente como aquellos que presentan múltiples partes (agentes) en interacción no lineal. Evidentemente, esta definición presenta una gran generalidad y, como tal, es susceptible de integrar un elevado número de sistemas de los más variados órdenes. Entre las principales características de los denominados sistemas complejos podemos destacar las siguientes:

- a) Emergencia: existen propiedades y pautas de comportamiento en el sistema complejo global que no están presentes en sus constituyentes, sino que emergen como resultado de las interacciones de estos últimos. Esta es una de las propiedades más características de un sistema complejo.
- b) Relaciones no lineales de corto alcance: hay interacción entre agentes conectados en red que se encuentran acoplados de manera no lineal, de tal modo que un estímulo puede producir un enorme efecto o ninguno.
- c) Efectos de retroalimentación: los sistemas complejos muestran la existencia de bucles de retroalimentación tanto positivos como negativos, mediante los que la conducta de los constituyentes del sistema se ve condicionada por sus propias acciones en el pasado. Este es el origen de la dificultad de distinguir en tantos ámbitos de las ciencias sociales la causa del efecto.
- d) Sistemas abiertos: a través de fronteras de difícil definición se intercambia de manera constante energía, materia e información, lo que provoca que los sistemas complejos se encuentren normalmente muy alejados de su potencial equilibrio.
- e) Sistemas anidados: los componentes de sistemas complejos normalmente son sistemas complejos.
- f) Historia: la historia de un sistema complejo es crucial, ya que pequeños cambios pueden implicar fuertes variaciones en su comportamiento futuro.
- g) Fenómenos invariantes de escala: inexistencia de una escala característica en el sistema, fenómeno resultante de las no linealidades de las interacciones entre sus constituyentes.
- h) Autoorganización: normalmente los sistemas complejos son estructuras disipativas autoorganizadas, pudiendo incluso alcanzar puntos críticos en el curso de su evolución dinámica autónoma (criticalidad autoorganizada).
- i) Sistemas autoadaptativos: a través de su evolución libre y espontánea mediante las fluctuaciones de sus componentes son capaces de adaptarse a las condiciones del entorno.

Esta categoría de los sistemas complejos es capaz de articular el conjunto de la realidad en una cadena de emergencias que se van sucediendo desde el origen

mismo del universo hasta la formación de las civilizaciones y organizaciones humanas. Este proceso ha sido magistralmente descrito a nivel divulgativo por Harry Morowitz (2002) en su obra *The Emergence of Everything*. Estamos, pues, ante una categoría omnicomprensiva que permite la integración de diferentes órdenes y de sistemas muy diversos, lo que la configura como marcadamente interdisciplinar. Esta ha crecido a lo largo del pasado siglo con las aportaciones de la mecánica estadística y de la termodinámica no lineal, desde luego, pero también de la teoría de sistemas de Von Bertalanffy (1968) y Lazslo (1996), de la teoría de sistemas dinámicos, de la teoría del caos, de la cibernética de Wiener, de la geometría fractal, de la teoría de redes complejas o de la inteligencia artificial, entre otras.

Es lógico, pues, que estemos ante un ámbito de difícil acotamiento y, por lo tanto, que aún exista una cierta indefinición en los objetos y métodos de estudio. En particular, la descripción matemática de los sistemas complejos dista mucho de ser un tema sencillo y bien establecido. A diferencia de los sistemas simples, es necesario en general tratar la estructura y la dinámica de estos sistemas en su totalidad desde una perspectiva global, no estando admitidas en la mayoría de las situaciones las descomposiciones o divisiones del sistema. La interacción de los muchos constituyentes que forman el sistema complejo crea nuevas pautas de comportamiento emergentes no presentes en los componentes por separado, definiendo un todo único e irreducible a sus partes.

La descripción de este fenómeno desde un punto de vista físico-matemático es un reto que hace necesario acudir a diferentes ramas de la matemática, desde la estadística de procesos estables no gaussianos a la teoría de redes complejas, pasando por el cálculo estocástico o por la teoría de sistemas dinámicos. Es de destacar la inexistencia de un formalismo estándar como el del cálculo infinitesimal para los sistemas simples, debido al hecho de que no resulta aplicable el principio de superposición, lo que provoca la frecuente inexistencia de aproximaciones analíticas. Por ello, la simulación por computadora se convierte en una herramienta fundamental para el análisis de estos sistemas como única manera de describir el sistema en su conjunto de manera numérica. A pesar de esto, se han producido grandes avances en el campo que permiten hablar hoy de una física de sistemas complejos, de una biología de sistemas, de una ciencia de la complejidad. Por ello, no exageramos si decimos que, a pesar de su carácter fronterizo, indefinido, que dificulta una descripción científica tal y como la hemos conocido hasta ahora, el problema de la complejidad constituye probablemente el marco problemático más importante de la ciencia contemporánea tanto en las ciencias experimentales como, muy principalmente, en el de las ciencias sociales, cuyos objetos de estudio suelen ser intrínsecamente complejos.

Por lo que respecta a la economía, el camino hacia la economía de la complejidad está abierto y recorriéndose. Para los teóricos de la complejidad la economía es un sistema complejo autoadaptativo (Anderson *et al.*, 1988; Arthur *et al.*, 1997; Blume y Durlauf, 2005) al que, para ser adecuadamente descrito, deben aplicársele

todas las técnicas y métodos de investigación que se han desarrollado en otras ciencias como la física²⁶, la matemática, la biología o la cibernética. Muchos –la amplia mayoría– son los fenómenos económicos que no admiten una descripción en los sencillos términos del formalismo neoclásico, y que deben ser abordados mediante técnicas específicas procedentes de otros ámbitos. Así, por ejemplo, la modelización de la transmisión de información en un mercado –sistema complejo jerárquicamente organizado– precisa de manera ineludible de la teoría de redes complejas para modelizar la estructura de las conexiones entre los agentes que lo integran, y de la teoría de sistemas dinámicos para analizar la difusión de la información (o de cualquier otro proceso) en ese *network* estructural (Albert y Barabási, 2002; Pastor-Satorras *et al.*, 2003; Namatame *et al.*, 2006; Boccaletti *et al.*, 2006). Solo mediante la introducción de la red –auténtico esqueleto de todo sistema complejo– podremos captar todas las pautas imitativas inherentes a la condición humana, y que son las que en última instancia determinan muchos de los fenómenos emergentes que observamos en el comportamiento de los mercados. De la misma manera, no podremos comprender las crisis de los mercados financieros –fenómenos cooperativos en los que se rompe la simetría entre compras y ventas de activos– sin recurrir a la teoría de fenómenos críticos desarrollada en el ámbito de la mecánica estadística (Voit, 2003; Sornette, 2003a, 2003b); o será imposible analizar adecuadamente la estadística de los precios de activos en los mercados financieros –esa en la que Mandelbrot (1963, 1983, 1997) desarrolló el concepto mismo de fractalidad –sin acudir a la teoría de procesos estables no gaussianos (procesos de Lévy) (Mantegna y Stanley, 2000; Voit, 2003)– que explican la existencia de colas gruesas paretianas asociadas a distribuciones potenciales en múltiples ámbitos de la economía, entre ellos los mercados financieros. En fin, no será posible captar toda la riqueza de comportamiento de mercados en modelos que capten de forma realista las características esenciales de mercados reales, si no acudimos a la simulación numérica.

Todos estos cambios son el reto fundamental de la economía contemporánea, y son hoy objeto de intenso trabajo por parte de un nutrido grupo de físicos y economistas²⁷. En nuestra opinión, un campo en el que aún no se ha realizado suficiente trabajo, y que merece la pensar explorar, es la utilización sistemática de la termodinámica no lineal –donde ya no son válidas las relaciones de Onsager ni, por lo tanto, el teorema de mínima producción de entropía, y los sistemas pueden empezar a autoorganizarse– para la descripción de los procesos de producción en economía, lo que podría resultar en una comprensión de las pautas espaciales (economía

²⁶ La aplicación de los conceptos de la física en sentido amplio al estudio de problemas económicos se denomina hoy econofísica, aunque este término denotaba originariamente el estudio de los mercados financieros.

²⁷ Actores muy importantes en este recorrido son, entre otros, los integrantes del denominado Instituto de Santa Fe (ISF), principalmente dedicado al estudio de la complejidad y fundado, precisamente, con un ya famoso debate entre físicos y economistas en la década de los años ochenta acerca de la naturaleza y los métodos de la economía. Remitimos al lector al artículo de B. Miedes en este mismo bloque temático para referencias adicionales.

geográfica) y temporales (ciclos y crecimiento) que observamos en la economía. Una teoría no lineal de la producción económica que integre plenamente las exigencias del segundo principio de la termodinámica debería resultar en una formalización del equivalente económico de las estructuras disipativas de I. Prigogine. Sin duda, estas y otras cuestiones forman parte de ese camino nunca acabado del conocimiento humano, que para la economía se abrió con la obra de los clásicos, continuó con la formalización de la síntesis neoclásica y que se proyecta al futuro con la economía de la complejidad. Solo nos resta desearle buen viaje.

BIBLIOGRAFÍA

- ALBERT, R.; BARABÁSI, A.L. (2002): "Statistical Mechanics of Complex Networks", *Rev. Mod. Phys.*, 74, pp. 47-97.
- ANDERSON, P. (1972): "More is Different", *Science*, 177, pp. 393-396.
- ANDERSON, P.; ARROW, K.; PINES, D. [ed.] (1988): *The Economy as an Evolving Complex System*. Redwood City, CA: Addison-Wesley.
- ARROW, K.J. (1962): "The Economic Implications of Learning by Doing", *Review of Economic Studies*, 29 (3), pp. 155-173.
- ARTHUR, B. (1990): "Positive Feedbacks in the Economy", *Scientific American*, (February), pp. 80-85.
- ARTHUR, B. (1999): "Complexity and the Economy", *Science*, 284, pp. 107-109.
- ARTHUR, B.; DURLAUF, S.N.; LANE, D.A. (1997): *The Economy as an Evolving Complex System II*. Reading, MA: Addison-Wesley.
- BEINHOCKER, E.D. (2006): *The Origin of Wealth*. Boston, MA: Harvard Business School Press.
- BLUME, E.L.; DURLAUF, S.N. (2005): *The Economy as an Evolving Complex System III. Current Perspectives and Future Directions*. Oxford: Oxford University Press.
- BOCCALETTI, S. *et al.* (2006): "Complex Networks. Structure and Dynamics", *Phys. Rep.*, 424, pp. 175-308.
- CARNOT, N.S. (1824): *Sur la puissance motrice du feu*.
- CLAUSIUS, R. (1867): "Über verschiedene für die Anwendung bequeme Formen der Hauptgleichungen der mechanischen Wärmetheorie", en: *Abhandlungen über die mechanische Wärmetheorie*.
- DE GROOT, S.R.; MAZUR, P. (1962): *Non-Equilibrium Thermodynamics*. Amsterdam: North-Holland.
- DOMAR, E.D. (1946): "Capital Expansion, Rate of Growth and Employment", *Econometrica*, 14 (2), pp. 137-147.
- FINE, B. (2000): "Endogenous Growth Theory: A Critical Approach", *Cambridge Journal of Economics*, 24 (2), pp. 245-265.
- FOSTER, J. (1993): "Economics and the Self-Organisation Approach: Alfred Marshall Revisited?", *Economic Journal*, 103, pp. 975-991.
- GEORGESCU-ROEGEN, N. (1971): *The Entropy Law and the Economic Process*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- GLANSDORFF, P.; PRIGOGINE, I. (1971): *Thermodynamic Theory of Structure Stability and Fluctuations*. London: Wiley.

- HAHN, F.H.; MATTHEWS, R.C.O. (1967): "The Theory of Economic Growth: A Survey", en American Economic Association and Royal Economic Society: *Surveys of Economic Theory. Growth and Development*, vol. II. London: Macmillan.
- HARROD, R.F. (1939): "An Essay in Dynamic Theory", *Economic Journal*, 49, pp. 14-33.
- HICKS, J.R. (1937): "Mr. Keynes and the 'Classics': A Suggested Interpretation", *Econometrica*, 5 (2), pp. 147-159.
- HICKS, J.R. (1950): *Value and Capital: An Inquiry Into Some Fundamental Principles of Economic Theory*. Oxford: Clarendon Press.
- HOLLAND, J.H. (2006): "Studying Complex Adaptive Systems", *Journal of Systems Science and Complexity*, 19 (1), pp. 1-8.
- JAYNES, E.T. (1991): *How Should WE Use Entropy IN Economics?* <<http://bayes.wustl.edu/etj/articles/entropy.in.economics.pdf>>.
- JEVONS, W.S. (1888): *Theory of Political Economy*. 3ª ed. London: MacMillan.
- JEVONS, W.S. (1905): *Principles of Economics: A Fragment of the Treatise on the Industrial Mechanism of Society and Other Papers*. New York, NY: MacMillan.
- KATCHALSKY, A.; CURRAN, P.F. (1946): *Non-Equilibrium Thermodynamics in Biophysics*. Cambridge, Ma: Harvard University Press.
- KEYNES, J.M. (1936): *The Collected Writings of John Maynard Keynes*. Vol. VII: *The General Theory of Employment, Interest and Money*. (London: Macmillan, 1973).
- KONDEPUDI, D.; PRIGOGINE, I. (1998): *Modern Thermodynamics: From Heat Engines to Dissipative Structures*. Chichester: Wiley.
- LASZLO, E. (1996): *The Systems View of the World. A Holistic Vision of our Time*. New York, NY: Hampton Press.
- LUCAS, R. (1988): "On the Mechanics of Economic Development", *Journal of Monetary Economics*, 22 (1), pp. 3-42.
- MANDELBROT, B.B. (1963): "The Variation of Certain Speculative Prices", *J. Business*, 36, pp. 394-419.
- MANDELBROT, B.B. (1983): *The Fractal Geometry of Nature*. New York, NY: Freeman.
- MANDELBROT, B.B. (1997): *Fractals and Scaling in Finance*. New York, NY: Springer-Verlag.
- MANTEGNA, R.N.; STANLEY, H.E. (2000): *An Introduction to Econophysics: Correlations and Complexity in Finance*. Cambridge: Cambridge University Press.
- MEADE, J.E. (1961): *A Neo-Classical Theory of Economic Growth*. London: Allen and Unwin.
- MIROWSKI, P. (1988): *Against Mechanism*. Totowa, NJ: Rowman & Littlefield.
- MIROWSKI, P. (1989): *More Heat than Light: Economics as Social Physics, Physics as Nature's Economics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- MODIGLIANI, F. (1944): "Liquidity Preference and the Theory of Interest and Money", *Econometrica*, 12 (1), pp. 45-88.
- MORIN, E. (2006): *El método*. Vol. 1. *La Naturaleza de la Naturaleza*. 7ª ed. Madrid: Cátedra.
- MOROWITZ, H.J. (2002): *The Emergence of Everything*. Oxford: Oxford University Press.
- NAMATAME, A.; KAIZOUJI, T.; ARUKA, Y. [ed.] (2006): *The Complex Network of Economic Interactions: Essays in Agent-Based Economics and Econophysics*. Berlin: Springer.
- NUWAYHID, R.Y.; JABER, M.Y.; ROSEN, M.A.; SASSINE G.P. (2006): "On the Thermodynamic Treatment of Diffusion-Like Economic Commodity Flows", *Int. J. Energy*, 3 (1), pp. 103-117.

- ONSAGER, L. (1931): "Reciprocal Relations in Irreversible Processes. I", *Phys. Rev.*, 37, p. 405.
- PALMA, J.G. (2009): "The Revenge of Markets on Rentiers. Why Neo-Liberal Reports of the End of History Turned Out to be Premature", *Cambridge Journal of Economics*, 33 (4), pp. 829-869.
- PASTOR-SATORRAS, R.; RUBI, M.; DÍAZ GUILERA A. [ed.] (2003): *Statistical Mechanics of Complex Networks*. Berlin: Springer.
- PRIGOGINE, I. (1945): *Etude thermodynamique des phénomènes irréversibles*. (Thèse d'agrégation présentée en 1945 à l'Université Libre de Bruxelles).
- PRIGOGINE, I. (1974): *Introducción a la termodinámica de los procesos irreversibles*. Madrid: Selecciones Científicas.
- PRIGOGINE, I. (1977): *The Nobel Prize in Chemistry 1977. Ilya Prigogine*. <http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1977/prigogine.html>.
- PRIGOGINE, I.; HERMAN, R. (1971): *Kinetic Theory of Vehicular Traffic*. New York, NY: Elsevier.
- RESCHER, N. (1998): *Complexity. A Philosophical Overview*. New Brunswick: Transactions Publishers.
- ROMER, P.M. (1986): "Increasing Returns and Long-Run Growth", *Journal of Political Economy*, 94 (5), pp. 1002-1038.
- SASLOW, W. (1999): "An Economic Analogy to Thermodynamics", *Am. J. Phys.*, 67, p. 1239.
- SCHNEIDER, E.D.; SAGAN, D. (2005): *La termodinámica de la vida. Física, cosmología, ecología y evolución*. Barcelona: Tusquets.
- SCHRÖDINGER, E. (1944): *What is Life?* Cambridge: Cambridge University Press.
- SEN, A. [ed.] (1970): *Growth Economics*. Harmondsworth: Penguin Education.
- SHAHID ALAM, M. (2005): *The Economy as an Energy System*. Boston, MA: Northeastern University. <<http://www.economics.neu.edu/papers/documents/05-003.pdf>>.
- SMITH, E.; FOLEY, D. (2008): "Classical Thermodynamics and Economic General Equilibrium Theory", *Journal of Economic Dynamics and Control*, 32 (1), pp. 7-65.
- SOLOW, R. (1956): "A Contribution to the Theory of Economic Growth", *Quarterly Journal of Economics*, 70 (1), pp. 65-94.
- SOLOW, R. (1957): "Technical Change and the Aggregate Production Function", *Review of Economics and Statistics*, 39 (3), pp. 312-320.
- SOLOW, R. (1988): "Growth Theory and After", *American Economic Review*, 78 (3), pp. 307-317.
- SORNETTE, D. (2003a): *Critical Market Crashes*. (Physics Reports, 378).
- SORNETTE, D. (2003b): *Why Stock Markets Crash (Critical Events in Complex Financial Systems)*. Princeton: Princeton University Press.
- SWAN, T.W. (1956): "Economic Growth and Capital Accumulation", *The Economic Record*, 32, (November), pp. 334-361.
- TSIRLIN, A.M.; KAZAKOV, V.; KOLINKO, N.A. (2003): "A Minimal Dissipation Type-Based Classification in Irreversible Thermodynamics and Microeconomics", *Eur. Phys. J. B.*, 35, pp. 565-570.
- UZAWA, H. (1965): "Optimum Technical Change in an Aggregative Model of Economic Growth", *International Economic Review*, 6 (1), pp. 18-31.
- VOIT, J. (2003): *The Statistical Mechanics of Financial Markets*. Berlin: Springer-Verlag.

- VON BERTALANFFY, L. (1968): *General System Theory: Foundations, Development, Applications*. New York, NY: Braziller.
- VON NEUMANN, J.; MORGENSTERN, O. (1953): *Theory of Games and Economic Behavior*. 3ª ed. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- WALRAS, L. (1969): *Elements of Pure Economics*. New York, NY: Kelley.
- WOODFORD, M. (2008): "Convergence in Macroeconomics: Elements of the New Synthesis", *AEA Annual Meeting*, pp. 1-23. (Publicado en *American Economic Journal: Macroeconomics*, 2009, 1 (1), pp. 267-279).