

Vida científica

EFEMÉRIDES

50 AÑOS DE LAS INESTABILIDADES QUE ROMPEN LA SIMETRÍA EN SISTEMAS DISIPATIVOS DE ILYA PRIGOGINE Y GREGOIRE NICOLIS

Uno de los trabajos más innovadores de los muchos que vieron la luz durante la “década prodigiosa” de los años 60 fue el que Ilya Prigogine y Gregoire Nicolis dedicaron al estudio de los sistemas disipativos en 1967 [1]. Con esta publicación, que recordamos aquí por haber cumplido ya 50 años, se puede decir que se inició un nuevo campo de conocimiento que fructificó en obras posteriores de los mismos autores, ya sea conjuntamente o por separado, y sobre todo animó a muchos otros investigadores a adentrarse en el proceloso mundo de la inestabilidad y el caos que se avistaba desde sus páginas.

En poco tiempo, la teoría propuesta para un tipo especial de sistemas, que en principio sólo interesaban a unos pocos físicos y químicos, se extendió hacia problemas muy variados de mucho mayor alcance, relacionados con nuevas ideas acerca de la auto-organización, la complejidad y el caos, que se reconocieron en muchos fenómenos biológicos y sociales de interés general.

ANTECEDENTES

En el trabajo de Prigogine y Nicolis confluyen dos líneas de investigación de muy diferente enfoque. La línea principal corresponde a la Termodinámica de los procesos irreversibles, entendiendo por tales aquellos procesos en los que la entropía global aumenta con el tiempo, como son prácticamente todos los naturales. Entre sus pioneros destaca Boltzmann, que encontró la conexión entre la entropía y la distribución de velocidades de las moléculas individuales, explicando así la evolución de los sistemas macroscópicos en términos de la probabilidad de los estados de sus constituyentes microscópicos (1872). También cabe recordar a Onsager, que estableció las relaciones recíprocas entre flujos y fuerzas típicas de los sistemas que no están en equilibrio (1931), las cuales se consideran oficiosamente el “cuarto Principio” de la

Termodinámica. Existía además una tradición de estudios termodinámicos en la escuela de Bruselas, fundada por Théopile de Donder, donde ingresó un juvenil Prigogine para realizar su tesis doctoral sobre el *Estudio termodinámico de los fenómenos irreversibles* (1945).

La línea secundaria, pero muy influyente, es el estudio de la organización que caracteriza a los seres vivos. Dentro de este gran tema son especialmente intrigantes los procesos que regulan el desarrollo y la diferenciación de los organismos, los cuales se designan globalmente como morfogénesis. Cabe citar al respecto una contribución singular, debida al matemático Alan Turing, más conocido por sus aportaciones a la Informática y la Criptografía, que de modo un tanto enigmático realizó en 1952 un trabajo en solitario acerca de las bases químicas de la morfogénesis [2]. En esta obra, de la que no se conocen precedentes que la inspiraran ni tampoco seguidores próximos que la desarrollasen, se atribuye la diferenciación de las células a la acción de ciertas sustancias químicas, que reciben el nombre de morfógenos por su capacidad de regular la aparición de formas específicas. Dichos morfógenos participan en un esquema complejo constituido por reacciones químicas catalizadas o inhibidas por ellos, que son condicionadas por sus propios procesos de difusión. Las reacciones y las difusiones están coordinadas de tal modo que el sistema evoluciona de modo inevitable desde un estado inicial uniforme hasta una distribución final heterogénea, en la cual surgen nuevas formas.

Aunque el trabajo de Turing impresiona todavía hoy por su originalidad y elegancia, parece más probable que la diferenciación y el crecimiento celular se produzcan, no por una transición espectacular entre dos estados, sino a través de una sucesión de otros muchos, en la que se desencadenan unas inestabilidades a partir de otras, de tal modo que la uniformidad inicial se va diversificando a lo largo de un proceso esencialmente irreversible y de gran complejidad.

En definitiva, el problema general que confluía en las dos líneas, la puramente termodinámica y la biológica, era explicar la formación espontánea de estructuras que tenía lugar en sistemas alejados del equilibrio. Estas estructuras reciben el nombre de “disipativas”, en contras-

te a “conservativas”, debido a que se forman en un sistema abierto mediante un intercambio continuo de materia, energía, o ambas cosas con el exterior, lo que conlleva una producción de entropía que es disipada hacia los alrededores del sistema. A primera vista puede parecer contradictorio que la disipación de entropía acompañe a la formación de una estructura dotada de mayor organización que la inicial, pero basta considerar que el aumento de entropía se produzca en el universo formado por el sistema (que accede a una mayor organización estructural) más los alrededores (que se desorganizan en mayor grado), para que este proceso hipotético evolucione en la forma prevista por el segundo Principio de la Termodinámica.

De hecho, este comportamiento tiene relación con diversos problemas reales, ya sean físicos (inestabilidad hidrodinámica), químicos (reacción-difusión) o biológicos (organización biológica), en todos los cuales el sistema accede por su propio impulso a una mayor estructuración que la que posee inicialmente [3]. Este fenómeno de auto-organización se define como el orden que surge en un sistema de forma espontánea cuando se superan unos parámetros críticos. El caos, en el sentido científico del término, es un tipo particular de auto-organización que presenta un comportamiento aparentemente aleatorio, debido a su extrema sensibilidad a las condiciones iniciales, por lo que suele ser impredecible en la práctica.

La explicación al nivel molecular más profundo de estos fenómenos remite al problema suscitado originariamente por Boltzmann de conjuntar lo macroscópico y lo microscópico. Este objetivo requiere establecer una base química, como había propuesto Turing; de ahí que el trabajo de Prigogine y Nicolis se publicara en el *Journal of Chemical Physics*, dedicado a los problemas fronterizos entre la Física y la Química.

ACERCA DE LOS AUTORES

Ilya Prigogine (1917-2003) fue un científico belga de origen ruso. Estudió en la Universidad Libre de Bruselas, donde desarrolló su labor docente e investigadora, extendida a otras instituciones, principalmente el Instituto Solvay de Bruselas, la Universidad de Texas en Austin y el Instituto Enrico Fermi de la Universidad de Chicago. En el período comprendido entre 1954 y 1971 publicó varios textos de termodinámica, teoría molecular de disoluciones e incluso de teoría cinética del tráfico de vehículos. Desde 1957 hasta su fallecimiento fue coeditor,



Figura 1. Ilya Prigogine.

junto con P. Debye y con Stuart A. Rice, de la prestigiosa serie *Advances in Chemical Physics*, dedicada a la revisión crítica de novedades en el área de la Química Física [4].

Unos años después de la publicación del trabajo que se reseña, en concreto en 1977, se concedió a Prigogine el premio Nobel de Química en solitario “por sus contribuciones a la termodinámica de no equilibrio, particularmente a la teoría de las estructuras disipativas”. Desde entonces se dedicó principalmente a reflexionar sobre problemas científicos y temas generales de difícil tratamiento, del tipo de la relación entre el caos y el orden, la complejidad, las conexiones entre ciencias y humanidades, y muy especialmente la problemática del tiempo como magnitud física. En estos temas llevó a cabo una encomiable labor de difusión publicando una serie de libros destinados al gran público, bien como único autor [5] o con su principal colaboradora la química y filósofa belga Isabelle Stengers [6]. Para la comunidad de la



Figura 2. Gregoire Nicolis.

UNED merece un grato recuerdo por haber sido el primer Doctor Honoris Causa de esta Universidad, a propuesta de la Facultad de Ciencias, distinción que recibió el 31 de octubre de 1985 impartiendo una lección sobre la creación del orden a partir del caos, la cual al producirse en este sentido y no en el contrario encierra sin duda una profunda enseñanza universitaria.

Gregoire Nicolis (1939-) es un investigador belga de origen griego. También ha desarrollado su labor fundamentalmente en la Universidad Libre de Bruselas, donde comenzó a trabajar con Prigogine en 1965 en el problema de los fenómenos de transporte en sistemas no uniformes, para dedicarse después al estudio de sistemas disipativos, inestabilidades y auto-organización. Además de los libros realizados en colaboración con Prigogine [7] ha publicado otros que tratan de problemas no lineales y sistemas complejos [8]. Así mismo ha colaborado en la edición de varias revistas dedicadas a estos temas, principalmente: *Journal of Nonequilibrium Thermodynamics*; *Advances in Chemical Physics*; *Dynamics and Stability of Systems*; *Bifurcation and Chaos*; y *Chaos, Solitons and Fractals*.

PRINCIPALES APORTACIONES DEL TRABAJO

El trabajo reseñado [1] estudia la aparición de inestabilidades en sistemas disipativos, dedicando una especial atención a aquellos sistemas abiertos que presentan un conjunto de reacciones químicas autocatalíticas entre unos componentes que sufren difusión, dentro del mismo esquema de reacción-difusión propuesto originalmente por Turing (página 3542). La extensa introducción incluye no sólo el planteamiento del trabajo, sino también una explicación verbal de las conclusiones obtenidas, reservando los detalles de los cálculos para los apartados siguientes.

El desarrollo se inicia planteando el mecanismo cinético de las reacciones químicas que forman el sistema de Turing. Se deduce que dicho mecanismo es consistente con las reglas generales que actúan bajo condiciones muy próximas al equilibrio, lo que técnicamente se adscribe a la "región lineal" de la termodinámica de los procesos irreversibles (p. 3544). A continuación se permite que la difusión esté también presente, y se estudia su efecto sobre la estabilidad de los estados estacionarios del sistema en cuestión, o sea unos estados de no equilibrio que son independientes del tiempo (p. 3545). Este estudio se generaliza después para estados estacionarios

suficientemente alejados del equilibrio, aunque no totalmente fuera del equilibrio (p. 3547). El resultado clave es que más allá de un punto crítico de transición, que marca una bifurcación en la evolución del sistema, las reglas de la termodinámica irreversible en el intervalo puramente lineal dejan de ser válidas. Surge entonces una inestabilidad que rompe la simetría inicial, precisamente por el efecto de la difusión (p. 3549). No obstante, esta nueva situación de heterogeneidad en el sistema sólo se puede mantener durante un tiempo si se cumple un balance muy estricto entre las velocidades de reacción y la difusión.

Se destaca que existe una semejanza llamativa entre el sistema químico de Turing y las estructuras hidrodinámicas de Bénard, en el sentido de que en ambos casos se produce una ruptura de la simetría inicial que da lugar a la formación de estructuras disipativas. Desde este momento se puede afirmar que existe una relación entre disipación y organización, tanto en fenómenos físicos como químicos (p. 3550).

Una vez reconocido este comportamiento similar, se apunta como extrapolación que las inestabilidades encontradas podrían desempeñar también un papel esencial en los procesos biológicos, muy especialmente en las primeras etapas que regulan el desarrollo genético. Esta hipótesis se concreta en la afirmación de que las estructuras que soportan una función biológica sólo se pueden originar en un medio disipativo y han de ser mantenidas mediante un aporte continuo de energía. Pero una estructura disipativa es un fenómeno singular, que existe sólo para un estrecho intervalo de valores de los parámetros, debido a la necesidad de cumplir el delicado balance que se debe establecer entre velocidades de reacción y difusión. En el momento en que se perturba alguno de estos factores, toda la organización adquirida hasta entonces sufre un colapso. Así se explica el hecho bien conocido de que una célula puede estar viva o muerta sin que se altere grandemente su composición química; es la propia organización interna del sistema la que resulta muy diferente en uno y otro caso (p. 3550).

En conclusión, se propone que el estudio de las inestabilidades puramente químicas puede llevar a una mejor comprensión de procesos biológicos fundamentales (p. 3550). Como comentó alguien con buen humor, quedaba demostrado científicamente que la única manera posible de vivir es llevar una vida disipada.

CONSECUENCIAS

Entre las obras realizadas de forma conjunta por ambos autores con posterioridad al trabajo reseñado, merecen destacarse sus estudios acerca de las fluctuaciones en sistemas alejados del equilibrio [9] y del orden biológico producido por inestabilidades [10], que fueron completados en los libros más conocidos dedicados a la auto-organización y la complejidad [7].

Con todo ello se despertó un gran interés por los fenómenos de auto-organización en muy diversos campos del ámbito de las ciencias, las humanidades y las ciencias sociales, en los que se buscaron procesos reales que ilustrasen los conceptos de auto-organización, complejidad, emergencia y caos. Esta corriente llevó a hablar de una nueva "termodinámica social". De esta diversidad de temas dan idea una multitud de publicaciones, de las que como meros ejemplos se pueden recordar un libro editado por la Comisión Europea que atiende especialmente a los aspectos científicos [11], y otro que explica con amabilidad y rigor los nuevos aspectos que presenta la sociedad considerada como un caso de complejidad [12].

Es de lamentar que la gran amplitud de los temas a tratar haya dificultado formular unas definiciones más precisas de los conceptos fundamentales, así como diseñar una estrategia para el tratamiento efectivo de estos problemas que vaya más allá de unas ideas generales que a base de repetirse, muchas veces fuera de contexto, se han llegado a convertir en tópicos. Pero aun reconociendo que las leyes que supuestamente rigen la evolución de la economía, la sociología o la política siguen siendo inextricables, existen problemas de interés que se pueden estudiar a niveles más asequibles. Así por ejemplo, sería importante dilucidar los mecanismos cooperativos que controlan la formación irreversible de estructuras de cierta complejidad a partir de compuestos químicos relativamente sencillos. En este contexto convendría delimitar con precisión las características del auto-ensamblaje y de la auto-organización, que son fenómenos que inciden en muchos aspectos de la nanotecnología y la biología sintética de interés actual [13].

REFERENCIAS

- [1] Prigogine, I. y Nicolis, G.: *Journal of Chemical Physics*, **46**, 3542-3550 (1967).
- [2] Turing, A.: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B*, **237**, 37-72 (1952).
- [3] Tabony, J.: *Biology of the Cell*, **98**, 589-602 (2006).

- [4] Rice, S.A.: *Advances in Chemical Physics*, **128**, V (2004).
- [5] Principalmente Prigogine, I.: *From being to becoming. Time and complexity in the physical sciences*. W.H. Freeman, New York, 1980; *¿Tan sólo una ilusión?. Una exploración del caos al orden*. Tusquets, Barcelona, 1983; *El nacimiento del tiempo*. Tusquets, Barcelona, 1991; *Las leyes del caos*. Crítica, Barcelona, 1999; *Is future given?* World Scientific, Singapore, 2003.
- [6] Principalmente Prigogine, I. y Stengers, I.: *Order out of chaos. Man's new dialogue with Nature*. Bantam Books, Toronto, 1984; *Entre el tiempo y la eternidad*. Alianza Editorial, Madrid, 1994; *El fin de las certidumbres*. Taurus, Madrid, 1997 (Stengers figura como colaboradora pero no como coautora); *La nueva alianza: Metamorfosis de la ciencia*. Alianza Editorial, Madrid, 1997.
- [7] Nicolis, G. y Prigogine, I.: *Selforganization in nonequilibrium systems: From dissipative structures to order through fluctuations*. John Wiley & Sons, New York, 1977; *La estructura de lo complejo*. Alianza Editorial, Madrid, 1997.
- [8] Nicolis, G.: *Introduction to nonlinear Science*. Cambridge University Press, Cambridge, 1995; Nicolis, G. y Nicolis, C.: *Foundations of complex systems: Nonlinear Dynamics, Statistical Physics, information and prediction*. World Scientific, Singapore, 2007; Nicolis, G. y Nicolis, C.: *Foundations of complex systems: Emergence, information and prediction* (2ª edición). World Scientific, Singapore, 2012.
- [9] Nicolis, G. y Prigogine, I.: *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, **68**, 2102-2107 (1971).
- [10] Prigogine, I. y Nicolis, G.: *Quarterly Reviews of Biophysics*, **4**, 107-148 (1971).
- [11] Biebricher, C.K., Nicolis, G. y Schuster, P.: *Self-organization in the physico-chemical and life sciences*. European Commission, Bruselas, 1995.
- [12] Ball, P.: *Why Society is a complex matter. Meeting twenty-first century challenges with a new kind of Science*. Springer, Heidelberg, 2012.
- [13] Bensaude-Vincent, B.: *Nanoethics*, **3**, 31-42 (2009); *History and Philosophy of the Life Sciences*, **38**, 13 págs. (2016).

Fernando Peral Fernández
Dpto. de Ciencias y Técnicas Fisicoquímicas