

¿Qué es la vida? 76 años después: una mirada desde la termodinámica y los sistemas complejos

G. Cocho^{a,†}, R. Mansilla^b and J. M. Nieto-Villar^{c,*}

^aInstituto de Física de la UNAM, México.

^bCentro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades, UNAM, México.

^cDepartamento de Química-Física, Grupo A. Alzola de Termodinámica de los Sistemas Complejos de La Cátedra Lomonosov, Universidad de La Habana, La Habana 10400 Cuba. Miembro Correspondiente de la Academia Mexicana de Ciencias.

*e-mail: nieto@fq.uh.cu

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7214-1940>

†Prof. Dr. Germinal Cocho in memoriam

Received 15 May 2020; accepted 10 June 2020

Se presenta una panorámica de los tópicos fundamentales del trabajo seminal de Schrödinger, *¿Qué es la vida?* Capítulos 6 y 7 respectivamente y se establece un análisis de los mismos desde el formalismo de la termodinámica de los procesos irreversibles y los sistemas complejos. De esta forma, se establecen una serie de consideraciones epistemológicas que evidencian la importancia y actualidad del trabajo de Schrödinger, no solamente desde el punto de vista físico sino además de su trascendencia filosófica.

Descriptores: Termodinámica irreversible; entropía termodinámica; sistemas complejos; filosofía de la ciencia; sistemas biológicos.

An overview of the fundamental topics of Schrödinger's seminal work, **What is life?** Chapters 6 and 7, respectively, and an analysis of them from the thermodynamic formalism of irreversible processes and complex systems is presented. In this way, a series of epistemological considerations are established that demonstrate the importance and topicality of Schrödinger's work, not only from the physical point of view but also of its philosophical significance.

Keywords: Irreversible thermodynamics; entropy thermodynamics; complex systems; philosophy of science; systems biology.

PACS: 05.70.Ln; 05.70.-a; 89.75.-k; 82.39.Rt; 01.70.+w; *43.10.Mq; 87.18.Vf

¿Qué es la vida? ha sido y es una de las preguntas más intrigantes y fascinantes a lo largo de la historia de la humanidad [1], lo que representa un reto para las mentes más lúcidas de todos los tiempos y cuya respuesta deviene en un contenido epistemológico y ontológico de gran trascendencia.

Hoy existen más de 100 definiciones de qué es la vida [2], aunque en general muchas de ellas se tratan con escepticismo [3]. Constituye una temática que por se aparece tratada tanto en el ámbito filosófico como del científico [4,5,6].

Curiosamente, fue el físico E. Schrödinger, uno de los padres fundadores de la mecánica cuántica [7], quien hace 75 años en 1945 se hizo esa pregunta en la obra titulada: *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*.

El trabajo pionero de Schrödinger tuvo y tiene una vigencia invaluable en la actualidad, ya que a pesar del desarrollo que han tenido las ciencias biológicas no se ha podido develar el misterio de la vida.

Una pregunta clave planteada por Schrödinger fue: “¿cómo pueden la física y la química explicar los acontecimientos en el espacio y el tiempo que tienen lugar dentro de los límites espaciales de un organismo vivo?”, que acertadamente respondió: “...La evidente incapacidad de la Física y la Química actuales para tratar tales fenómenos no significa en absoluto que ello sea imposible...” [7].

El objetivo del presente trabajo es establecer un marco teórico conceptual, a la luz de la termodinámica los procesos irreversibles y los sistemas complejos, de algunas de las ideas planteadas por Schrödinger, que nos conduzcan a una serie de

consideraciones epistemológicas sobre el tema en cuestión.

El trabajo está organizado como sigue: en el **acápite I** se ofrece un análisis a partir del formalismo de la termodinámica y los sistemas complejos de los tópicos fundamentales de la obra de Schrödinger [7], capítulos 6 y 7; finalmente en el epílogo, acápite II, se presentan una serie de consideraciones epistemológicas.

1. Análisis de los tópicos fundamentales de la Obra de Schrödinger a la luz del formalismo de la termodinámica y los sistemas complejos

Centraremos nuestro análisis en algunos tópicos relevantes que aparecen en los capítulos 6 y 7 [7], mostrando su importancia y vigencia actual a través de un análisis crítico basado en la teoría de la complejidad y la termodinámica de los procesos irreversibles.

En el capítulo 6 [7], “ORDEN, DESORDEN Y ENTROPÍA”, se plantean las siguientes ideas:

1. ...las leyes de la Física, tal como las conocemos, son leyes estadísticas y tienen mucho que ver con la tendencia natural de las cosas de ir hacia el desorden...;...El principio general que interviene es la famosa segunda ley de la termodinámica (principio de la entropía) y su igualmente famoso fundamento estadístico...

2. *...La vida se alimenta de entropía negativa..., La expresión entropía negativa ha encontrado oposición y sembrado la duda entre algunos colegas físicos...*
3. *...todo lo que pasa en la Naturaleza, significa un aumento de la entropía de aquella parte del mundo donde ocurre. Por lo tanto, un organismo vivo aumentará continuamente su entropía o, como también puede decirse, produce entropía positiva (y por ello tiende a aproximarse al peligroso estado de entropía máxima que es la muerte). Sólo puede mantenerse lejos de ella, es decir, vivo, extrayendo continuamente entropía negativa de su medio ambiente...*
4. *...Organización mantenida extrayendo orden del entorno...*

Por otra parte, en el capítulo 7 [7], “¿ESTÁ BASADA LA VIDA EN LAS LEYES DE LA FÍSICA?”, se esbozan los siguientes planteamientos:

1. *...El orden encontrado en el desarrollo de la vida procede de una fuente diferente...*
2. *...no debe desanimarnos que tengamos dificultad en interpretar la vida por medio de las leyes ordinarias de la Física. Eso es lo que cabía esperar de lo que hemos aprendido sobre la estructura de la materia viva. Debemos estar preparados para encontrar un nuevo tipo de ley física que la gobierne...*
3. *...Relación entre mecanismo de relojería y organismo...*

De cara a entender cada uno de estos aspectos, resumiremos los aspectos fundamentales de la termodinámica incluyendo la visión clásica, irreversible, estadística y de la complejidad que nos sirvan de fundamento teórico a las interrogantes planteadas por Schrödinger [7] en los capítulos 6 y 7 de la obra citada mostradas en este trabajo.

Existe una extensa y valiosa obra de la llamada termodinámica clásica [8-10], así como de los procesos irreversibles [11-14] por lo cual remitimos al lector interesado a revisar los aspectos generales que acá se tratan.

Durante años, los formalismos de la termodinámica de los procesos irreversibles y de los sistemas complejos (dinámica no lineal) han estado aparentemente inconexos. Existen una serie de trabajos líderes [15-17] que han contribuido a la unificación de ambos, mostrando como la termodinámica constituye per se un fundamento teórico de los fenómenos complejos y es además una herramienta para su estudio.

En relación a lo planteado en el capítulo 6 tal parecería que la Segunda Ley (SL) contradice la evolución temporal de los sistemas naturales, lo cual está muy lejos de la realidad.

La Segunda Ley, ya en su formulación clásica, ofrece el marco formal para la formulación de un criterio evolutivo [18] para los procesos macroscópicos de los sistemas naturales. Así de acuerdo con Th. De Donder [18], se tiene que

$$dS_S = \delta S_e + \delta S_i, \quad (1)$$

donde dS_S representa la variación de entropía del sistema, δS_e es el flujo de entropía, es decir, la entropía intercambiada con el ambiente y δS_i es la entropía creada durante la evolución temporal del sistema.

Por lo tanto, el postulado fundamental de la Segunda Ley se formula como

$$\delta S_i \geq 0, \quad (2)$$

y expresa el criterio evolutivo, es decir, el sentido direccional de los sistemas naturales a escala macroscópica [18] y que constituye el postulado fundamental de la Segunda Ley de la Termodinámica. En el equilibrio, como caso particular de atractor del sistema, se cumple que: $\delta S_i = 0$. La principal limitación de la desigualdad (2) es la ausencia del tiempo en la misma. Esta limitación la suple el formalismo de la termodinámica de los procesos irreversibles [11,12].

La generalización de la SL se ofrece en el marco del formalismo de los procesos irreversibles [19], en donde se incluye el tiempo en dicha formulación. Así se tiene que

$$\frac{dS_S}{dt} = \frac{dS_e}{dt} + \frac{dS_i}{dt}, \quad (3)$$

donde $dS_S/dt \equiv \dot{S}_S$ es la velocidad de entropía del sistema, $dS_e/dt \equiv \dot{S}_e$ es el flujo de entropía y $dS_i/dt \equiv \dot{S}_i$ es la producción de entropía por unidad de tiempo. La igualdad (3) se puede reescribir como

$$\dot{S}_S = \dot{S}_e + \dot{S}_i. \quad (4)$$

Así, el criterio evolutivo se puede generalizar como: $\dot{S}_i > 0$, que de hecho constituye uno de los postulados sobre el cual descansa el formalismo de los procesos irreversibles y la esencia de la Segunda Ley.

Por otra parte, es bueno señalar que una gran mayoría de procesos biológicos ocurren a través de estados estacionarios [20-25], por lo cual estos revisten especial interés para los seres vivos.

Los estados estacionarios fueron definidos inicialmente en el marco de la termodinámica de procesos irreversibles [11,12] y, de forma paralela, en la dinámica no lineal. Fueron llamados puntos fijos [26,33] e incorporados acertadamente en el formalismo termodinámico a través de los trabajos de Prigogine y *et al.*, [27,37]. Los estados estacionarios son estados dinámicos los cuales son considerados atractores de los sistemas dinámicos [27] y revisten especial interés en el marco de la teoría de la complejidad.

Así, se puede definir un estado estacionario como aquel estado dinámico atractor de un sistema [9,11-13,18,19], para el cual se cumple que durante un tiempo finito las variables de estado y los parámetros de control permanecen constantes, y se verifican flujos disipativos, $\dot{S}_i > 0$, tal que

$$\dot{S}_i = -\dot{S}_e. \quad (5)$$

Es decir, a la misma velocidad que se produce entropía \dot{S}_i , se intercambia con los alrededores \dot{S}_e , de forma que $\dot{S}_S = 0$. En 1948 Shannon [28] definió empíricamente la entropía para un proceso de Markov discreto con probabilidades p_1, p_2, \dots, p_n como

$$S = -k \sum_n p_n \ln p_n, \quad (6)$$

donde k es una constante que determina las unidades de la entropía. Si es igual a la constante de Boltzmann ($k_B = 1,3806 \times 10^{-23}$ J/K) las unidades son [J/K]. Por otra parte, si $k = 1/\ln 2$, entonces las unidades de la entropía son dígitos binarios.

La Ec. (6) es una generalización de la entropía de Gibbs-Boltzmann, la cual es definida en la vecindad del equilibrio termodinámico, en el formalismo de la termodinámica estadística [29]. Las bases teóricas de la entropía de Shannon fueron establecidas por Khinchin en 1957 [30].

Físicamente, la entropía de un sistema, propuesta por Shannon, Ec. (6), mide la complejidad de un sistema. De esta forma se derivan los siguientes corolarios sobre la entropía:

1. Es diferente de la energía y se crea durante la evolución de un sistema;
2. Tiene un carácter probabilístico;
3. Le impone un carácter irreversible a los procesos naturales, ya que se crea entropía durante el proceso, pero no se destruye;
4. Mide la complejidad de un sistema;
5. Proporciona un sentido físico al tiempo.

Resumiendo entonces los diferentes aspectos planteados en el capítulo 6, "ORDEN, DESORDEN Y ENTROPÍA", se puede decir que:

1. La entropía del sistema, \dot{S}_S , mide la complejidad, y su evolución temporal, postulado de la SL, ocurre en la dirección de que la velocidad de producción de entropía sea positiva, es decir, $\dot{S}_i > 0$.
2. La evolución temporal puede transcurrir a través de múltiples estados estacionarios, es decir, a la misma velocidad que se crea entropía, se cede al entorno, $\dot{S}_i = -\dot{S}_e$, ("...se alimenta de entropía negativa..."), de forma que $\dot{S}_S = 0$.
3. La "muerte" del sistema dinámico ocurre cuando este alcanza el equilibrio termodinámico, es decir, $\dot{S}_S = 0$.

De cara a entender las interrogantes formuladas en el capítulo 7, "¿ESTÁ BASADA LA VIDA EN LAS LEYES DE LA FÍSICA?", debemos brevemente exponer algunos aspectos fundamentales de la teoría de la complejidad.

La física siempre trata de encontrar una definición precisa y rigurosa de sus conceptos, por lo que para responder a

la pregunta *¿qué se entiende por complejidad?* el físico Seth Lloyd recolectó en 2001 [31] 31 definiciones de este concepto, divididas en grupos según su génesis. Actualmente, esta lista incluye más de 45 definiciones, entre las cuales se encuentran: entropía de Shannon, entropía de Gibbs-Boltzmann, complejidad algorítmica (Chaitin, Solomonoff y Kolmogorov), entropía de Renyi, entropía de Tsallis, entropía de Kolmogorov, dimensión fractal, entre muchas otras.

De la complejidad exhibida por los sistemas dinámicos debemos resaltar los siguientes aspectos generales, esenciales para comprender este fenómeno:

1. Complejo no debe verse como sinónimo de complicado ya que un sistema descrito por pocos grados de libertad puede exhibir una alta complejidad durante su evolución.
2. La complejidad se manifiesta a través de la aparición de propiedades emergentes [27]. Estas son observables macroscópicos que no siempre pueden deducirse de las reglas de interacción que rigen la evolución de los diferentes componentes de los sistemas.
3. La dimensión de los patrones, tanto temporales como espaciales, generalmente no es un número entero y es superior a su dimensión topológica; por lo tanto, se dice que tienen una dimensión fractal [32].
4. Los procesos complejos descritos por los sistemas dinámicos deterministas, en muchas ocasiones, muestran una dependencia sensible con respecto a las condiciones iniciales, un comportamiento que puede confundirse con procesos estocásticos y conocido como caos determinista [33].
5. Para que un sistema dinámico determinista exhiba un comportamiento complejo, debe cumplir con dos requisitos fundamentales: la no linealidad, existencia de procesos de retroalimentación (feedback).
6. El mecanismo fundamental que describe las propiedades emergentes y la complejidad de un sistema se basa en la ocurrencia de bifurcaciones [34].

Los fenómenos de transición lejos del equilibrio termodinámico son consecuencia de bifurcaciones y correlaciones, que pueden tener relevancia para el comportamiento macroscópico.

Las bifurcaciones en los sistemas dinámicos [34] son análogas a las transiciones de fase en la vecindad del equilibrio [35]. Estas resultan de la amplificación a escala macroscópica de fluctuaciones microscópicas, las que conducen a la inestabilidad del estado estacionario y constituye el mecanismo fundamental de la aparición de la complejidad [36] y consecuentemente de la auto-organización fuera del equilibrio [37].

De este modo el sistema dinámico exhibe oscilaciones espaciales y/o temporales, periódicas y/o aperiódicas, mostrando patrones complejos y robustos.

De esta forma, tenemos en relación con las interrogantes planteadas: *...El orden encontrado en el desarrollo de la vida procede de una fuente diferente...,...relación entre mecanismo de relojería y organismo...*, podemos decir:

1. El “orden” observado en las estructuras “vivas” es debido a la auto-organización del sistema, lejos del equilibrio termodinámico.

Es bueno aclarar que la auto-organización no es ubicua de los sistemas vivos, se manifiesta en cualquier orden jerárquico en la naturaleza, ejemplos paradigmáticos lo constituyen por mencionar algunos las celdas de Bernard-Marangoni [38], la célebre reacción BZ, Belusov-Zhabotinskii [39], las cuales exhiben bellos patrones que muestran oscilaciones espacio-temporales.

2. En relación con el símil, *...relación entre mecanismo de relojería y organismo...*, tal y como hemos reiterado la auto-organización se manifiesta a partir de oscilaciones espacio-temporales.

2. Epílogo

En relación a la interrogante planteada por Schrödinger “¿cómo pueden la física y la química explicar los acontecimientos en el espacio y el tiempo que tienen lugar dentro de los límites espaciales de un organismo vivo?”, que acertadamente en su momento respondió: “...La evidente incapacidad de la Física y la Química actuales para tratar tales fenómenos no significa en absoluto que ello sea imposible...”.

Vemos como, según lo discutido en el cuerpo del trabajo, Schrödinger avizoró acertadamente como el desarrollo

científico de la física, en particular, la termodinámica y los sistemas complejos, que constituyen las bases teóricas necesarias para entender el problema.

En donde subrayó: *...no debe desanimarnos que tengamos dificultad en interpretar la vida por medio de las leyes ordinarias de la Física.....Debemos estar preparados para encontrar un nuevo tipo de ley física que la gobierne...;* y en este aspecto nuevamente nos deja una enseñanza epistemológica notoria: En ciencias, las interrogantes son, en ocasiones, más importantes que las respuestas.

En resumen a la pregunta *¿Qué es la vida?*, podemos concluir que aún queda mucho por hacer en un tema que necesita de mucha sapiencia y que subyacen muchas preguntas aun sin respuestas concretas, *¿coincide la complejidad biológica con la complejidad física?, ¿El criterio de evolución termodinámico mide la evolución biológica?,...*

Una respuesta plausible, desde la perspectiva acá planteada, a *¿qué es vida?* puede verse como la forma de manifestarse un sistema dinámico auto-organizado espacio-temporal lejos del equilibrio termodinámico el cual exhibe una alta complejidad, robustez y adaptabilidad.

En palabras del Profesor Germinal Cocho, “...para entender la complejidad hay que buscar en lo simple...”

Agradecimientos

Prof. Dr. A. Alzola in memoriam. JMNv agradece al CEIICH y al IFUNAM de la UNAM México por la cálida hospitalidad y el apoyo financiero recibido a través de PREI-DGAPA-2019. Finalmente, a los revisores anónimos por sus valiosos comentarios y recomendaciones.

- i.* «My greatest concern was what to call it. I thought of calling it “information”, but the word was overly used, so I decided to call it “uncertainty”. When I discussed it with John von Neumann, he had a better idea. Von Neumann told me, “You should call it entropy, for two reasons. In the first place your uncertainty function has been used in statistical mechanics under that name, so it already has a name. In the second place, and more important, nobody knows what entropy really is, so in a debate you will always have the advantage”» (Tribus y McIrvine, p. 180, ver: Tribus, M. y E.C. McIrvine (1971): «Energy and Information», Scientific American, # 224, September, pp. 178-184.).
1. P. Davies, “What is life?”, *New Sci.*, **241** (2019) 28-31. [https://doi.org/10.1016/S0262-4079\(19\)30200-3](https://doi.org/10.1016/S0262-4079(19)30200-3)
 2. E. N. Trifonov, “Vocabulary of definitions of life suggests a definition”, *J. Biomol. Struct. Dyn.*, **29** (2011) 259-266. <https://doi.org/10.1080/073911011010524992>
 3. E. V. Koonin, “Defining life: an exercise in semantics or a route to biological insights?”, *J. Biomol. Struct.*

Dyn., **29** (2012) 603-605. <https://doi.org/10.1080/073911012010525000>

4. A. Moreno y J. Peretó, “¿Qué es la vida? de Erwin Schrödinger ¿Vale la pena leerlo?”, *SEEBM*, **175** (2013) 7-9.
5. E. D. Schneider y J. J. Kay, “*Order from disorder: the thermodynamics of complexity in biology. What is life? The next fifty years*”, (Cambridge University Press, Cambridge, 1995), 161-172. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511623295.013>
6. M.L. Cárdenas, G. Piedrafita, F. Montero y A. Cornish-Bowden, “¿Qué es la vida?”, *SEEBM*, **175** (2013) 14-17.
7. E. Schrödinger, *What is life?: The physical aspect of the living cell* (Cambridge University Press, London, 1944).
8. I. Prigogine, y R. Defay, *Chemical Thermodynamics*, (Longman, London, 1967).
9. D. Kondepudi y I. Prigogine, *Modern Thermodynamics, from Heat Engines to Dissipative Structures*, (Wiley, New York, 1998).
10. I. Santamaría-Holek, *Termodinámica moderna*, (Trillas, México, 2014).

11. S.R. De Groot y P. Mazur, *Non-Equilibrium Thermodynamics*, (North-Holland Publishing Company, Amsterdam, 1962).
12. I. Prigogine, *Étude Thermodynamique des Phénomènes irréversibles*, Thèses d'agrégation de l'Enseignement supérieur de l'Université Libre de Bruxelles, Dunod, Editeurs Paris y Editions Desoer Liege, (1947).
13. A. Katchalsky y P. Curran, *Non-Equilibrium Thermodynamics in Biophysics*, (Harvard University Press, Cambridge, 1965).
14. L. García-Colín y P. Goldstein Menache, *Procesos irreversibles, Teoría y Aplicaciones*, (El Colegio Nacional, 2013).
15. C. Beck y F. Schlögl, *Thermodynamics of Chaotic Systems: An Introduction*, (Cambridge University Press, New York, 1993).
16. P. Gaspard, M. Henneaux, y F. Lambert, Editors, *From dynamical systems theory to nonequilibrium thermodynamics*, Symposium Henri Poincaré, Proceedings International Solvay Institutes for Physics and Chemistry, Brussels, (2007) 97-119.
17. R. Mansilla y J.M. Nieto-Villar, *La Termodinámica de los sistemas complejos*, (UNAM, México, 2017).
18. R.L. Quintana González, L. Giraldo Gutiérrez, J.C. Moreno Piraján y J.M. Nieto-Villar, *Termodinámica*, (Universidad de Los Andes, Bogotá, 2005).
19. I. Prigogine, *Introduction to Thermodynamics of Irreversible Processes*, (Wiley, New York, 1961).
20. A. Katchalsky y P. Curran, *Non-Equilibrium Thermodynamics in Biophysics*, (Harvard University Press, Cambridge, 1965).
21. Selected Papers by Aharon Katzir-Katchalsky, *Polyelectrolytes, Mechanochemistry, Irreversible Thermodynamics, Membrane Processes, Network Thermodynamics, Biophysics Science and Humanities*, (Academic Press Inc. New York, San Francisco, London, 1976).
22. D. Hershey, *Entropy Theory of Aging Systems Humans, Corporations and the Universe*, (Imperial College Press 2010).
23. M. V. Volkenstein, *Entropy and Information*, (Birkhauser Verlag AG, 2009).
24. A.I. Zotin, *Thermodynamic Principles and Reaction of Organisms*, (in Russian), (Moscow, Nauka, 1988).
25. D. Jou, y J.E. Llebot, *Introducción a la Termodinámica de Procesos Biológicos*, (Ed. Labor S.A., Barcelona, 1989).
26. A. Andronov, A. Vit, y C. Chaitin, *Theory of Oscillators*, (Pergamon Press, Oxford, 1966).
27. G. Nicolis y C. Nicolis, *Foundations of Complex Systems. Nonlinear Dynamics. Statistical Physics. Information and Prediction*, (World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, Singapore, 2007).
28. C.E. Shannon, A Mathematical Theory of Communication, *The Bell System Technical Journal* **27** (1948) 623-656. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>.
29. Yu. L. Klimontovich, *Statistical Physics*, (Nauka, Moscow, 1982; Harwood Academic Publishers, New York, 1986).
30. A.I. Khinchin, *Mathematical Foundations of Information Theory*, (Dover Publications, Inc., New York, 1957).
31. S. Lloyd, Measures of complexity: a nonexhaustive list, *IEEE, Control Systems*, **21** (2001) 7-8. <https://doi.org/10.1109/MCS.2001.939938>
32. B.B. Mandelbrot, *The fractal geometry of Nature*, (W.H. Freeman and Company, Nueva York, 1982).
33. V.S. Anishchenko *et al.*, *Nonlinear Dynamics of Chaotic and Stochastic Systems*, (Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2007).
34. Y.A. Kuznetsov, *Elements of applied bifurcation theory*, **vol. 112**, (Springer Science and Business Media, 2013).
35. L.D. Landau, On the theory of phase transitions, *Ukr. J. Phys.* **53** (2008) 25-35.
36. G. Nicolis y D. Daems, Probabilistic and thermodynamic aspects of dynamical systems, *Chaos* **8** (1998) 311-320. <https://doi.org/10.1063/1.166313>
37. G. Nicolis y I. Prigogine, *Self-Organization in Nonequilibrium systems*, (Wiley, New York, 1977).
38. M. G. Velarde y R. K. Zeytounian, (Eds.), *Interfacial phenomena and the Marangoni effect*, (Vienna/New York, Springer, 2002).
39. R.J. Field y M. Burger, *Oscillations and traveling waves in chemical systems*, (Wiley, New York, 1985).