

CAOS, COMPLEJIDAD E INTERDISCIPLINARIEDAD

Miguel A. F. Sanjuán

Grupo de Dinámica No Lineal, Teoría del Caos y Sistemas Complejos

Departamento de Física

Universidad Rey Juan Carlos

28933 Móstoles, Madrid

Dedicado al Prof. Andrés Fernández Díaz, con motivo de su 70º aniversario, en quien las ideas de caos, complejidad e interdisciplinarietà han fructificado con creces.

1. INTRODUCCION

Desde mediados del siglo XX el nuevo concepto de caos ha invadido el mundo de las ciencias abarcando tanto a las ciencias más básicas como la Física y las Matemáticas, como a las ciencias más aplicadas, entre las que se incluyen las ciencias sociales. La idea de caos viene ligada a la idea fundamental de dependencia sensible en las condiciones iniciales y al comportamiento irregular de algunos sistemas dinámicos en los que se pierde la capacidad de predicción a largo plazo. Unido a este concepto, se encuentra el de complejidad, que si bien no resulta fácil dar una definición al gusto de todos los que la usan, podríamos decir que es una cualidad que se predica de los sistemas que están formados por partes en los cuales la idea de emergencia juega un papel esencial y que se podría enunciar de una manera sencilla como que “el todo es más que la suma de sus partes”. Los campos de investigación que estos dos conceptos simples abren son enormes y abarcan a numerosas disciplinas, de modo que un nuevo reto intelectual aparece ligado a estas líneas de investigación, que es el de la interdisciplinariedad, lo que viene a decirnos que unas mismas ideas y métodos son aplicables a numerosas disciplinas de suyo diferentes, pero cuyas dinámicas guardan más similitudes de las que podrían pensarse a primera vista. Hablo de reto intelectual, porque lo fácil es seguir inmersos en nuestras estrechas disciplinas, sin hacer el esfuerzo de abrir nuestras mentes a lo que ocurre en otras disciplinas, y lo que ello implica de aprender nuevos lenguajes y nuevas formas de entender problemas comunes a ellas. En este artículo precisamente pretendo glosar algunas de estas ideas a la vez que aportar interesantes referencias que permitan al lector transmitirle la inquietud y el interés por los sistemas complejos y por la interdisciplinariedad que se deriva de su estudio.

2. CAOS Y COMPLEJIDAD

Posiblemente una de las ideas más profundas acerca de la naturaleza de lo que se conoce como comportamiento caótico o simplemente caos, sea la idea de *dependencia sensible a las condiciones iniciales*. Es decir, las trayectorias de un sistema caótico se alejan una de otra a medida que avanza el tiempo cuando parten de puntos iniciales muy próximos. Este hecho tiene consecuencias muy drásticas en la capacidad de predicción de la evolución de un sistema.

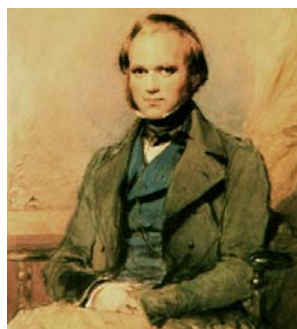


Fig. 1 Charles Darwin

En este año 2009 se cumplen 200 años del nacimiento del científico británico Charles

Darwin y 150 años desde que apareció su famoso libro *El Origen de las Especies* (1859) [1]. Resulta sorprendente leer en el capítulo XIV la frase: "*Nacen más individuos que los que pueden sobrevivir. Un grano en la balanza puede determinar qué individuos hayan de vivir y cuales hayan de morir, qué variedad o especie haya de aumentar en número de individuos y cual haya de disminuir o acabar por extinguirse*", que aparentemente pareciera estar describiendo de un modo casi poético la realidad de la vida y que sin embargo esconde la verdadera noción de dependencia sensible a las condiciones iniciales. Sin ninguna duda las ideas del caos y de la complejidad de los sistemas han sido y están siendo muy fructíferos en la ciencia de nuestros días.

Una de las ideas que se derivan de la noción de dependencia sensible a las condiciones iniciales es la incapacidad de predicción que de algún modo afecta a la naturaleza predictiva de las ciencias. La noción de espacio de fase se atribuye al físico americano Josiah Willard Gibbs (1839-1903), quien fue uno de los pioneros de la Teoría Cinética y es también considerado uno de los padres fundadores de la Mecánica Estadística, término que también acuñó. El concepto de espacio de fase juega un papel crucial en la Dinámica No Lineal, de tal modo que permite usar herramientas geométricas para analizar y visualizar un sistema dinámico dado.

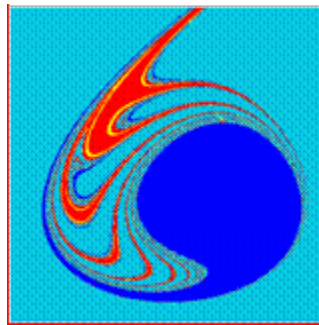


Fig. 2. Estructura fractal en el espacio de las fases de un oscilador no lineal, implicando dificultades a la hora de la predicción del sistema

Estudiar el espacio de fases de un determinado sistema dinámico permite obtener estructuras fractales complejas cuyas consecuencias físicas se plasman en la incertidumbre a la hora de determinar el estado ulterior del sistema. Se trata de un tipo de incertidumbre clásica, por oponerla a la tradicional incertidumbre cuántica, y de la que no se suele hablar. El premio Nobel de Física, Richard P. Feynman habla de ella en su famoso curso *Lecciones de Física* [13]. Una descripción bastante genérica de estas cuestiones aparece descrita en el artículo *Incertidumbre Clásica, Dispersión Caótica y Estructuras Fractales en Física* y que fue publicado en la Revista Española de Física [2], donde puede verse en algunos ejemplos sencillos de cómo aparece el concepto de incertidumbre ligado a sistemas físicos sencillos.

La complejidad del mundo supone un enorme contraste con la simplicidad de las leyes de la física. Este es quizás uno de los aspectos más llamativos de la física: la simplicidad de sus leyes. Tanto las ecuaciones de Maxwell del Electromagnetismo, como la ecuación de Schrödinger de la Mecánica Cuántica, así como la ecuación de Newton de la Mecánica Clásica se pueden escribir en unas simples líneas. Como indicaron en un trabajo publicado en *Science* en 1999 [3] los físicos Nigel Goldenfeld de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign y Leo P. Kadanoff de la

Universidad de Chicago de modo irónico: *"Todo es simple y ordenado -- excepto, por supuesto, el mundo.* De hecho, cuando uno mira al mundo lo que observa es de una complejidad asombrosa. Si bien, no existen por el momento leyes de la complejidad, tal y cómo existen las leyes de la física, los autores antes citados enumeran una serie de lecciones sencillas sobre la complejidad que se derivan del análisis y observación de numerosos sistemas complejos que existen en el universo.

Dentro del contexto de la física existen numerosos ejemplos de sistemas donde las propiedades emergentes son manifiestas. Dos ejemplos de ello, entre muchos otros, son la superconductividad y la superfluidez. Existe toda una investigación de carácter fundamental, que pretende investigar los fenómenos complejos, donde en lugar de acudir al reduccionismo, la propiedad fundamental es la emergencia. Además estos fenómenos complejos emergentes no se derivan de las leyes microscópicas.



Fig. 3 Philip W. Anderson, Premio Nobel de Física de 1977 y portada del artículo publicado en Science, *More is Different*.

Estas ideas fueron expuestas de una manera magistral por el físico Philip W. Anderson, Premio Nobel de Física de 1977 en un artículo publicado en la revista Science en 1972 y que lleva por título *"More is different"* [4] donde deja muy claro la idea de que *"a cada nivel de complejidad aparecen propiedades completamente nuevas, y la comprensión de estos nuevos comportamientos requiere investigación que entiendo tan fundamental en su naturaleza como cualquier otra"*.

Entre los muchos intentos de explicar lo que se entiende por Complejidad, se encuentra el reciente libro del físico Peter Erdi, *Complexity Explained* [5], donde se explica básicamente en qué consiste la investigación en sistemas complejos, su importancia en el contexto general de la ciencia, además de cómo su estudio contribuye a un mejor conocimiento de la función, la estructura y la dinámica de muchos sistemas complejos de la naturaleza, así como fenómenos sociales.



Fig. 4. Portada del libro Complexity Explained de Peter Erdi

Se muestra asimismo como muchos fenómenos naturales de suficiente complejidad se pueden analizar por los métodos de la dinámica no lineal y la teoría del caos y además se muestran las semejanzas existentes entre diferentes campos del conocimiento que poseen en común estructuras y arquitecturas similares. El libro presenta muchas de las principales ideas de modo descriptivo, y si bien se trata de un libro científico, no contiene demasiado formalismo, de modo que facilita su lectura para los lectores interesados en esta temática que no necesariamente posean unas herramientas formales avanzadas.

Como una muestra más del impacto que están teniendo las investigaciones en sistemas complejos, quisiera mencionar el caso del Prof. Geoffrey West, que es el presidente y *distinguished professor* en el Instituto Santa Fe, en Nuevo Mexico, centro pionero en la investigación de los sistemas complejos, quien en 2006 fue nominado entre los 100 personajes más influyentes del mundo según la revista TIME. En el boletín *Santa Fe Reporter* ha aparecido una entrevista con él, *SFR Talk: Science Guy* [6] donde entre otras cosas señala como grandes problemas abiertos de la ciencia las cuestiones sobre sistemas complejos, el medio ambiente y el calentamiento global, los sistemas financieros o la dinámica urbana; todos ellos incluidos dentro del paradigma de la complejidad, y donde el pensamiento interdisciplinar es una exigencia.

El futuro de la ciencia, así como el papel de las ciencias de la complejidad en el siglo XXI, está sido materia de análisis por parte de numerosos científicos. Entre ellos se encuentra el francés Hervé Zwirn, diplomado por la Ecole Polytechnique de Paris, así como por la Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications de Paris; y contando asimismo en su haber un Doctorado de Estado en Física. En el artículo "*La Complexité, science du XXI siècle*" publicado en la revista *Pour la Science* en el número correspondiente a Diciembre del 2003 [7] explora el campo de las ciencias de la complejidad, apuntando a su naturaleza y al principio de emergencia como elemento clave de éstas y señalando también el importante papel que jugará en el siglo XXI en el ámbito de las ciencias.

Uno de los ingredientes fundamentales de la ciencia de los sistemas complejos es su relación con el pensamiento y con una manera de pensar la ciencia. Es por ello natural que también resulte de interés a los filósofos y a estudiosos del pensamiento humano. En una reciente conferencia sobre Complejidad, Ciencia y Sociedad, tuvo lugar una sesión especial dedicada a la filosofía de la complejidad, donde uno de los principales ponentes fue el profesor Francis Heylighen del Departamento de Filosofía de la Vrije Universiteit Brussel (La Universidad Libre de Bruselas en lengua flamenca), que

impartió una lección titulada *Towards a Philosophy of Complexity*. Los interesados en este tema pueden encontrar más información en el artículo Complejidad y Filosofía [8].

El influjo que está teniendo sobre las ciencias sociales muchas herramientas provenientes de la ciencia de los sistemas complejos, tales como la ciencia de las redes complejas, además de la propia internet es enorme. Según el Director Asociado del Cornell Theory Center, Johannes Gehrke, “*Anteriormente, cuando los científicos sociales querían estudiar un pueblo tenían que ir a vivir con los lugareños. Hoy en día pueden estudiar el comportamiento humano a través de un nuevo mundo de datos provenientes de internet.*” La cantidad enorme de datos provenientes de internet está cambiando de manera radical la forma de estudiar fenómenos sociales complejos de una manera cuantitativa. Existen actualmente numerosos proyectos de investigación en esta línea intentando obtener información para las ciencias sociales a partir del análisis de los numerosos datos que las nuevas tecnologías están aportando. En este sentido la ciencia de las redes y los desarrollos recientes en el análisis de las series temporales está suponiendo un gran aldabonazo en el estudio de la complejidad de las ciencias sociales.

3. COMPLEJIDAD Y CIENCIAS DE LA VIDA

Uno de los campos en los que la metodología de los sistemas complejos está teniendo un enorme impacto es de las ciencias de la vida. La enorme cantidad de datos que se obtienen de la llamada revolución genómica, supone la necesidad de una nueva revolución conceptual a fin de integrar todos estos datos en un marco conceptual nuevo. Esta es una de las ideas, entre otras, que se describen en el interesante ensayo *Biology's next revolution* [9] que aparece en el número correspondiente al 25 de enero de 2007 de la revista Nature, y que escriben el físico Nigel Goldenfeld y el microbiólogo Carl Woese de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign. Los autores insisten en la idea que ya hemos comentado hablando de las ciencias sociales, acerca de la nueva perspectiva que se presenta para la biología, dentro de un contexto interdisciplinario donde disciplinas como la Dinámica No Lineal y la Física Estadística tienen mucho que decir. Asimismo ponen de manifiesto la necesidad de un nuevo marco conceptual donde un nuevo lenguaje sea necesario a fin de integrar nuevas técnicas que permiten comprender nuevos datos. Los métodos de la ciencia de los sistemas complejos son una de estas herramientas que se hacen imprescindibles en este reto de la biología del futuro.

El estudio de la complejidad de los seres vivos es, sin lugar a dudas, un tema científico de la mayor actualidad. A pesar de muchos de los esfuerzos que se han realizado y los que se realizarán en el futuro, no es fácil comprender la complejidad inherente a los sistemas vivos. Por un lado obedecen las leyes de la física y de la química, sin embargo, estas leyes no explican sus comportamientos, dado que cada una de las componentes de un sistema complejo interacciona de múltiples maneras con el resto generando de este modo propiedades emergentes. Por sorprendente que parezca, las interacciones entre las distintas moléculas que ocurren a nivel microscópico, pueden producir a nivel macroscópico una célula viva. La modelización y la simulación de los procesos biológicos con ayuda de herramientas tanto matemáticas como computacionales vienen siendo una ayuda estupenda a la hora de comprender y ganar conocimiento en los procesos biológicos. Los científicos Irun R. Cohen y David Harel del Weizmann Institute of Science de Israel analizan muchas de estas cuestiones en el

artículo de revisión *Explaining a Complex Living System: Dynamics, Multi-scaling and Emergence* [10] que sin duda son de especial interés para aquellos interesados en la complejidad de los seres vivos.

Mucho se ha venido hablando últimamente acerca de la vida como un sistema complejo, queriendo ello significar que las técnicas desarrolladas en el estudio de los sistemas complejos vienen siendo utilizadas en el análisis de los sistemas biológicos y en general en el intento de comprender la vida. En el libro del físico japonés Kunihiko Kaneko, de la Universidad de Tokyo, *Life: An Introduction to Complex Systems Biology* [11] se analizan muchos de los resultados de aplicar los principios que se han generado en el estudio de la dinámica no lineal de sistemas complejos a la biología molecular, celular y del desarrollo. De modo que su libro es una consecuencia natural del desarrollo de sus

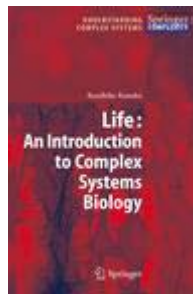


Fig. 5. Portada del libro *Life: An Introduction to Complex Systems Biology* de Kunihiko Kaneko

investigaciones en el campo. El papel que juega la dinámica no lineal y la física estadística en el análisis de problemas de biología, así como la dinámica de las interacciones y de los sistemas acoplados, además de las fluctuaciones son algunos de los temas tratados. Otras cuestiones de especial interés aparecen en el contexto de la llamada biología constructiva y otros aspectos relacionados con la diferenciación celular. Todo ello, como se ha dicho anteriormente, en el contexto de la biología de los sistemas complejos. Sin duda es una interesante aportación a la literatura de uno de los científicos que están liderando las incursiones en la biología de los métodos de la complejidad provenientes del mundo de la física.

El papel de las relaciones entre la Física y la Biología, así como el interés de las matemáticas dentro del contexto de la modelización de fenómenos biológicos complejos es crucial. Aunque actualmente asistimos a un momento en que las relaciones entre estas disciplinas se está acentuando, y se acentuará sin duda en el futuro, la historia de sus relaciones e interdependencias vienen de lejos. En el magnífico artículo *Mathematics, biology, and physics - interactions and interdependence* [12] publicado en *Notices of the American Mathematical Society* en 2005, el físico Michael Mackey, Joseph Morley Drake Professor of Physiology y Director del Centre for Nonlinear Dynamics in Physiology and Medicine, junto con el físico mexicano Moises Santillán, del Instituto Politécnico Nacional de Mexico, hacen un análisis bastante exhaustivo de las diferentes contribuciones e interacciones de ambas disciplinas en los últimos tres siglos. Lo que permite poner más aún en una mejor perspectiva la actividad que estamos presenciando actualmente en cuanto al desarrollo de las ciencias de la complejidad, y

los avances en las ciencias interdisciplinarias, donde sin duda, la física y las matemáticas juegan un papel esencial.

4. INTERDISCIPLINARIEDAD

En los últimos años se ha hablado mucho de diálogo entre disciplinas como fuente de inspiración de nuevos problemas y nuevas soluciones. Para el estudio de la complejidad este es uno de los elementos fundamentales, ya que aunque contando con metodologías varias, su objeto de estudio abarca problemas relacionados tanto con las llamadas ciencias *duras* como con las *blandas*. Sistemas complejos existen en biología, en química, en física, en sociología, en economía, etc...

Se habla mucho, sin entender muchas veces de lo que se está hablando, de interdisciplinariedad, de multidisciplinariedad, de pluridisciplinariedad, de transdisciplinariedad. Con frecuencia usándolos como sinónimos, cuando cada uno de los términos anteriores tiene significados precisos muy diferentes. Sin embargo sigue faltando el verdadero diálogo entre disciplinas necesario para el avance en el conocimiento de los sistemas complejos en particular y de la ciencia en general.

Con frecuencia se me pregunta acerca de las relaciones existentes entre la física, la química, la biología y las matemáticas. O bien en qué se benefician su interrelación. Tengo que decir que a veces me sorprenden las preguntas, aunque sin duda las entiendo, ya que en los últimos años se ha procedido al fenómeno de la super especialización y tal vez dando a entender que nada tiene que ver con nada, cuando la realidad es justamente lo contrario. Que todo o casi todo tiene que ver con todo. Como no es sencillo dar una breve respuesta a algunos de estos interrogantes, me ha venido a la cabeza una famosa cita del físico Richard Feynman, que recibió el Premio Nobel de Física en el año 1965 y que ilustra este problema de una manera muy clara. La cita en castellano dice:

Un poeta dijo una vez: "El Universo entero está contenido en un vaso de vino". Probablemente nunca sabremos lo que quería decir, ya que los poetas no escriben para ser comprendidos. Pero es cierto que si miramos un vaso de vino lo suficientemente cerca, vemos el Universo entero. Ahí están las cosas de la física: el líquido que se arremolina y se evapora dependiendo del viento y del tiempo, las reflexiones en el vidrio, y nuestra imaginación agrega los átomos. El vidrio es un destilado de las rocas terrestres y en su composición vemos los secretos de la edad del universo y la evolución de las estrellas. ¿Qué extraño arreglo de elementos químicos hay en el vino? ¿Cómo llegaron a ser? Están los fermentos, las enzimas, los sustratos y los productos. Allí en el vino se encuentra la gran generalización: toda vida es fermentación. Nadie puede descubrir la química del vino sin descubrir, como lo hizo Louis Pasteur, la causa de muchas enfermedades. ¡Cuán vívido es el vino tinto que imprime su existencia dentro del conocimiento de quien lo observa! ¡Si nuestras pequeñas mentes, por alguna conveniencia, dividen este vaso de vino, este universo, en partes – física, biología, geología, astronomía, psicología, etc. . . , recuerden que la naturaleza no lo sabe! Así, reunamos todo de nuevo sin olvidar en última instancia para qué sirve. Dejemos que nos dé un último placer: ¡bébanselo y olvídense de todo! Richard P. Feynman, 1918-1988. Del libro "The Feynman Lectures on Physics, v. 1, p. 3-10" [13], y que en su versión original en inglés dice:

A poet once said, "The whole universe is in a glass of wine." We will probably never

know in what sense he meant that, for poets do not write to be understood. But it is true that if we look at a glass of wine closely enough we see the entire universe. There are the things of physics: the twisting liquid which evaporates depending on the wind and weather, the reflections in the glass, and our imagination adds the atoms. The glass is a distillation of the earth's rocks, and in its composition we see the secrets of the universe's age, and the evolution of stars. What strange array of chemicals are in the wine? How did they come to be? There are the ferments, the enzymes, the substrates, and the products. There in wine is found the great generalization: all life is fermentation. Nobody can discover the chemistry of wine without discovering, as did Louis Pasteur, the cause of much disease. How vivid is the claret, pressing its existence into the consciousness that watches it! If our small minds, for some convenience, divide this glass of wine, this universe, into parts -- physics, biology, geology, astronomy, psychology, and so on -- remember that nature does not know it! So let us put it all back together, not forgetting ultimately what it is for. Let it give us one more final pleasure: drink it " and forget it all!

A mi juicio ilustra claramente la idea fundamental de lo que quería decir: que las disciplinas que hemos creado son únicamente una forma posible de poder acometer el estudio de ciertos fenómenos, olvidándonos de que todo o casi todo está relacionado con todo.

5. CONCLUSIONES

He pretendido ilustrar la importancia que han tenido y están teniendo conceptos nuevos en las ciencias como el caos y la complejidad, y cómo el estudio de la complejidad existente en numerosos fenómenos asociados a numerosas disciplinas científicas acarrea la necesidad de adoptar una actitud abierta frente a la interdisciplinariedad si de verdad queremos avanzar en el conocimiento integral de las ciencias. Como caso especial de sistemas complejos he situado a muchos problemas asociados a la biología y los seres vivos, aunque también muchos de estas ideas y avances pueden ser de ayuda en el conocimiento y avance en otras ciencias como las ciencias sociales. Espero haber podido transmitir esta inquietud y unas referencias que contribuyan al estímulo de avanzar en las aplicaciones de las ideas del caos y la complejidad a otras ciencias.

REFERENCIAS

1. Charles Darwin. *The Origin of Species*. 1859.
<http://www.talkorigins.org/faqs/origin.html>
2. Jacobo Aguirre and Miguel A. F. Sanjuán. Incertidumbre Clásica, Dispersión Caótica y Estructuras Fractales en Física. *Revista Española de Física* **18**(3), 23-27, 2004. Una copia puede encontrarse en:

http://www.escet.urjc.es/~fisica/investigacion/publications/Papers/2004/aguirre_ref043.pdf
3. Nigel Goldenfeld and Leo Kadanoff. Simple Lessons from Complexity. *Science* **284**, 87-89 (1999). Una copia puede encontrarse en:

[http://guava.physics.uiuc.edu/~nigel/REPRINTS/1999/Goldenfeld%20Simple%20Lessons%20from%20Complexity%20Science%201999%20\(PDF\).pdf](http://guava.physics.uiuc.edu/~nigel/REPRINTS/1999/Goldenfeld%20Simple%20Lessons%20from%20Complexity%20Science%201999%20(PDF).pdf)
4. Philip W. Anderson. *More is different*. *Science* **177**, 393-396, (1972). Una copia puede encontrarse en:

http://www.escet.urjc.es/%7Efisica/msanjuan/complejidad/anderson_science72.pdf
5. Peter Erdi. *Complexity Explained*. Springer Series on Complexity. Springer, New York, 2007.
6. Una copia de la entrevista puede encontrarse en:

http://sfreporter.com/stories/sfr_talk_science_guy/1922/
7. Hervé Zwirn. “La Complexité, science du XXI siècle”. *Pour la Science*. Diciembre 2003. Una copia puede encontrarse en:

<http://www.eurobios.com/upload/publications/La%20complexit%20science%20du%2021%20si%20cle%20-%20Zwirn%202003.pdf>

8. Francis Heylighen, Paul Cilliers y Carlos Gershenson. Complexity and Philosophy. Una copia puede encontrarse en: <http://uk.arxiv.org/ftp/cs/papers/0604/0604072.pdf>

9. N. Goldenfeld and C. Woese. Biology's next revolution. *Nature* **445**, 369-369 (2007) ([PDF](#)). Una copia puede encontrarse en:
[http://guava.physics.uiuc.edu/~nigel/REPRINTS/2007/Goldenfeld%20Biology%27s%20next%20revolution%20Nature%202007%20\(PDF\).pdf](http://guava.physics.uiuc.edu/~nigel/REPRINTS/2007/Goldenfeld%20Biology%27s%20next%20revolution%20Nature%202007%20(PDF).pdf)

10. I. R. Cohen and D. Harel. Explaining a Complex Living System: Dynamics, Multi-scaling and Emergence. *J. R. Soc. Interface* **4**, 175-182, 2007. Una copia puede encontrarse en:
<http://www.fractal.org/Bio-Nano-Robotics/Complex-Living-Systems.pdf>

11. Kunihiro Kaneko. Life: An Introduction to Complex Systems Biology. Berlin: Springer, 2006.

12. Michael Mackey and Moises Santillan: Mathematics, biology, and physics - interactions and interdependence. Notices AMS September 2005, 832-840. Una copia puede encontrarse en:
http://www.cnd.mcgill.ca/bios/mackey/pdf_pub/mathematics_2005.pdf

13. Richard P. Feynman, Robert B. Leighton and Matthew Sands. The Feynman Lectures on Physics. Addison-Wesley, California, 1963. v. 1, p. 3-10.