

DOCUMENTOS DE INVESTIGACIÓN

Facultad de Administración

No. 76, ISSN: 0124-8219
Mayo de 2010

El mundo de las ciencias de la complejidad Un estado del arte

Carlos Eduardo Maldonado
Nelson Alfonso Gómez Cruz



Universidad del Rosario
Facultad de Administración

El mundo de las ciencias de la complejidad

Un estado del arte

Documento de Investigación No. 76

Carlos Eduardo Maldonado
Nelson Alfonso Gómez Cruz

Centro de Estudios Empresariales para la Perdurabilidad - CEEP
Laboratorio de Modelamiento y Simulación Empresarial - LMyS

Universidad del Rosario
Facultad de Administración
Editorial Universidad del Rosario
Bogotá D.C.
Septiembre 2010

Maldonado, Carlos Eduardo

El mundo de las ciencias de la complejidad: Un estado del arte / Carlos Eduardo Maldonado y Nelson Alfonso Gómez Cruz. —Facultad de Administración, Centro de Estudios Empresariales para la Perdurabilidad – CEEP, Laboratorio de Modelamiento y simulación Empresarial – LMyS, Universidad Colegio Mayor de Nuestra Señora del Rosario. Bogotá: Editorial Universidad del Rosario, 2010.

96 p.— (Documento de Investigación; 76)

ISSN: 0124-8219

Análisis de sistemas / Complejidad (filosofía) / Filosofía de la ciencia / Paradigmas (teoría del conocimiento) / Teoría del conocimiento / I. Maldonado, Carlos Eduardo / II. Gómez Cruz, Nelson Alfonso / III. Título. / IV. Serie.

501 SCDD 20

Carlos Eduardo Maldonado
Nelson Alfonso Gómez Cruz

Corrección de estilo
Rodrigo Díaz Losada

Diagramación
Precolombi EU-David Reyes

Editorial Universidad del Rosario
<http://editorial.urosario.edu.co>

ISSN: 0124-8219

* Las opiniones de los artículos sólo comprometen a los autores y en ningún caso a la Universidad del Rosario. No se permite la reproducción total ni parcial sin la autorización de los autores.
Todos los derechos reservados.

Primera edición: septiembre de 2010

Impresión: Javegraf
Impreso y hecho en Colombia
Printed and made in Colombia

Contenido

Introducción	7
Sección 1	
Ciencias de la complejidad	12
1.1. Libros de recuentos periodísticos acerca de ciencias de la complejidad	14
1.2. Textos panorámicos, clásicos e introductorios sobre complejidad	14
1.3. Textos técnicos sobre diversos aspectos de la complejidad	16
1.4. Estado actual de las ciencias de la complejidad	18
1.4.1. Complejidad y termodinámica del no equilibrio	19
1.4.2. Complejidad y caos	20
1.4.3. Complejidad y fractales	21
1.4.4. Complejidad y catástrofes	21
1.4.5. Complejidad y redes	22
1.4.6. Complejidad y lógicas no-clásicas	23
1.5. Emergencia y autoorganización	25
Sección 2	
Modelamiento y simulación de sistemas complejos	27
2.1. Modelamiento y simulación de sistemas biológicos, sistemas inspirados biológicamente y vida artificial.....	30
Sección 3	
Ingeniería de sistemas complejos	38
3.1. Metaheurísticas (híbridas, paralelas, hiperheurísticas), optimización y resolución de problemas	39
3.2. Inteligencia computacional, inteligencia artificial bio-inspirada, computación suave, computación natural y computación bio-inspirada	42
3.3. Computación evolutiva	47
3.4. Inteligencia de enjambres.....	48
3.5. Computación con membranas	49
3.6. Computación inmune o sistemas inmunes artificiales	49

3.7. Complejidad, sistemas bio-inspirados, bio-robótica y bio-hardware	50
Sección 4	
Complejidad y computación	52
4.1. Complejidad computacional, teoría de la computación, problemas P y NP	53
4.2. Nuevos modelos de computación, nuevos paradigmas de programación, computación no estándar, computación no convencional e hipercomputación.....	54
4.3. Teoría algorítmica de la información.....	56
Sección 5	
Complejidad y sistemas vivos	57
Sección 6	
Complejidad y ciencias sociales	59
6.1. Bibliografía general sobre complejidad y ciencias sociales y humanas	59
6.2. Complejidad y sociología	60
6.3. Complejidad y antropología	61
6.4. Complejidad y filosofía	62
6.5. Complejidad e historia.....	62
6.6. Complejidad y psicología	63
6.7. Complejidad y estudios culturales.....	64
Sección 7	
Organizaciones y complejidad	65
7.1. Complejidad, organizaciones, administración, negocios, toma de decisiones.....	65
7.2. Complejidad, economía y finanzas	66
7.3. Consultoría empresarial en el marco de las ciencias de la complejidad	67
Sección 8	
Complejidad y...	69
8.1. Complejidad y educación.....	69
8.2. Complejidad y religión	69
8.3. Complejidad y sistemas militares.....	70
8.4. Complejidad y estética	71

Sección 9	
Complejidad en Colombia.....	72
9.1. Principales textos sobre complejidad en el país.....	72
9.2. Bibliografía sobre complejidad de Carlos E. Maldonado.....	73
Artículos.....	73
Libros y capítulos de libro.....	75
Producción bibliográfica sobre complejidad o relacionada con complejidad.....	78
Sección 10	
Centros de investigación, revistas, series de libros y eventos.....	80
10.1. Principales centros de investigación sobre complejidad en el mundo.....	80
10.2. Revistas especializadas sobre complejidad.....	82
10.3. Otras revistas relacionadas con complejidad.....	84
10.4. Series de libros sobre complejidad.....	84
10.5. Eventos sobre complejidad y campos afines.....	85
Vida artificial.....	86
Computación evolutiva, hardware evolutivo y robótica evolutiva.....	86
Inteligencia de enjambres.....	86
Sistemas inmunes artificiales.....	87
Autómatas celulares.....	87
Computación molecular.....	87
Computación natural.....	87
Inteligencia computacional.....	88
Sistemas bio-inspirados.....	88
Modelamiento, simulación y agentes.....	88
Computación no-convencional.....	88
Bioinformática.....	89
Sociedades sobre complejidad.....	89
Sección 11	
Bibliografía general introductoria a la complejidad.....	90
11.1. Bibliografía en español.....	90
11.2. Bibliografía en inglés.....	92
Postfacio.....	95

Carlos Eduardo Maldonado

Profesor Titular

Universidad del Rosario

Nelson Alfonso Gómez Cruz

Asesor en Modelamiento y Simulación Empresarial

Laboratorio de Modelamiento y Simulación

Universidad del Rosario

Introducción

La situación es verdaderamente apasionante. Mientras que en el mundo llamado real –y entonces se hace referencia a dominios como la política, la economía, los conflictos militares y sociales, por ejemplo–, la percepción natural –digamos: de los medios y la opinión pública– es que el país y el mundo se encuentran en condiciones difíciles; en algunos casos, dramática; y en muchas ocasiones trágica, en el campo del progreso del conocimiento asistimos a una magnífica vitalidad. Esta vitalidad se expresa en la ciencia de punta y, notablemente, en las *ciencias de la complejidad*.

Mientras que la ciencia normal –para volver a la expresión de Kuhn– se encuentra literalmente a la defensiva en numerosos campos, temas y problemas –digamos, a la defensiva con respecto al decurso de los acontecimientos y a las dinámicas del mundo contemporáneo–, en el contexto del estudio de los sistemas complejos adaptativos asistimos a una vitalidad que es prácticamente desconocida para la corriente principal de académicos –independientemente de los niveles en los que trabajan–, de científicos, de administradores de educación y de ciencia y tecnología (por ejemplo rectores, vicerrectores, decanos, directores de departamentos, tomadores de decisión, políticos y gobernantes). La corriente principal del conocimiento (*mainstream*) desconoce una circunstancia, un proceso, una dinámica que sí es conocida por parte de quienes trabajan e investigan activamente en el campo de las ciencias de la complejidad.

Pues bien, este libro quiere presentar, por primera vez en Colombia, por primera vez en América Latina y, por lo que conocemos, por primera vez en el mundo, un estado del arte acerca de las ciencias de la complejidad. Con él, podremos acercarnos, ya en profundidad, a lo que son, lo que significan y a los futuros –ciertamente muy promisorios– del trabajo en complejidad.

En el contexto colombiano y latinoamericano se comenzó a hablar primero de pensamiento sistémico: enfoques sistémicos, estudios sistémicos y demás. Autores como von Foester, Forrester, von Bertalanffy, la escuela de Palo Alto y autores como G. Bateson, por ejemplo, y más recientemente F. Capra, y siempre H. Maturana, fueron motivos de referencias y de trabajo en contextos diferentes. Posteriormente, estrechamente relacionado con el

anterior,¹ el tema giró hacia complejidad: sistemas complejos, pensamiento complejo, enfoque(s) de complejidad, y otras expresiones similares se convirtieron en el foco de la atención en comunidades amplias como la académica, el sector público y el sector privado. La referencia, en este segundo caso, indudablemente, fue la obra de E. Morin –y sus epígonos–. De lejos, claramente, el pensamiento complejo es la vertiente más popular –sociológicamente hablando–. A esto ayuda el lenguaje –siempre encantador– de E. Morin, sus intuiciones y la buena difusión de su obra.

Sin embargo, en el panorama internacional, la ciencia de punta (*spearhead science*, *spearhead research*) se sitúa del lado de las ciencias de la complejidad. A decir verdad, el establecimiento (*the establishment*: esto es, el *statu quo*) ya ha cooptado –se ha apropiado, digamos–, de los enfoques sistémicos (incluyendo la cibernética de primer y de segundo orden), tanto como del pensamiento complejo. Pero el sistema real –la *Realpolitik*– no ha podido apropiarse aún –en estamentos como el sector privado, la educación, los sistemas militares, el sector eclesiástico en general–, de las ciencias de la complejidad.

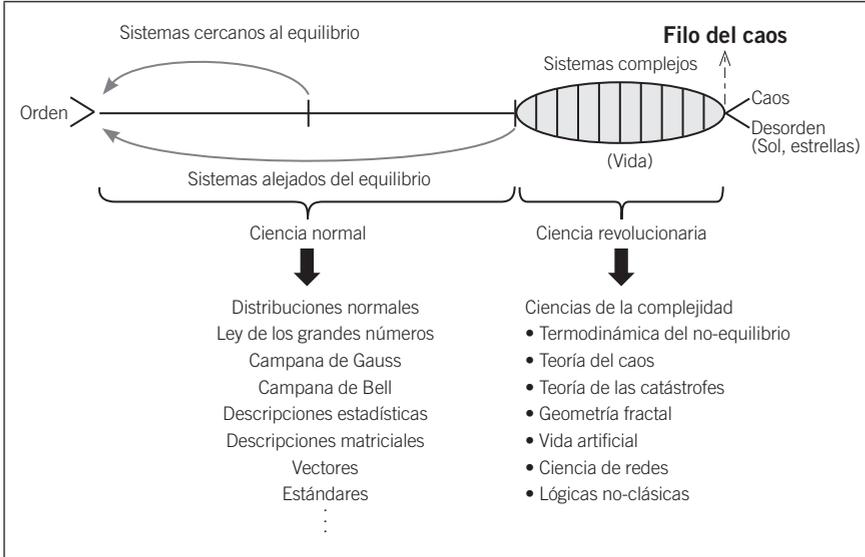
Cuando hablamos de ciencias de la complejidad, no simplemente hablamos de sistemas, fenómenos o comportamientos complejos: sino, más exactamente, de sistemas (fenómenos y/o comportamientos) de complejidad *creciente*. Como quiera que sea, el trabajo en complejidad es una circunstancia reciente pero sólida, fuerte, consistente, no obstante numerosas voces de escepticismo provenientes de ángulos distintos.

El siguiente esquema ilustra el espacio de las ciencias de la complejidad relativamente a toda la ciencia normal. Como se aprecia, el espacio más amplio –literalmente: es decir, en términos geográficos, demográficos, financieros, administrativos y humanos, por ejemplo–, es el de la ciencia normal. Con este esquema sencillamente queremos poner de manifiesto que las ciencias de la complejidad no se ocupan de todas las cosas; de todos los fenómenos, sistemas y comportamientos. Como sabemos hace ya mucho tiempo, gracias a la filosofía de la ciencia, una teoría que lo explica todo no explica nada (tal es el caso, por ejemplo, de la numerología, la astrología y demás).

¹ Hemos trabajado estas relaciones en Maldonado (2001).

Esquema 1

El espacio de las ciencias de la complejidad en contraste con la ciencia normal



Fuente: realizado por los autores

La comunidad, académica y científica, de complejólogos no se interesa por todos los aspectos y dimensiones de la realidad. Tan sólo por aquellos ámbitos en donde suceden imprecisiones, vacíos, incertidumbre, no-linealidad, sorpresas, emergencias, ausencia de control local, bifurcaciones, inestabilidades, fluctuaciones y cascadas de fallas; para mencionar tan sólo algunas de las características de los sistemas complejos.

Como quiera que sea, organizativa, institucionalmente, la historia de la complejidad es bastante reciente. Los primeros institutos se crean a finales de los años 1970: en 1978, el Centro de Estudios para la Dinámica No-Lineal en el Instituto La Jolla; a comienzos de los años 1980 se crea el Instituto Santa Cruz para la Ciencia No-Lineal, que nace a partir del Colectivo de Caos de Santa Cruz; en 1980 surge el Centro para Estudios No-Lineales en el Laboratorio Nacional de los Álamos; posteriormente, en 1981 se crea el Instituto para la Ciencia No-Lineal en la Universidad de California en Davis.

Finalmente, en 1984 surge el más famoso de todos los centros e institutos: el Instituto Santa Fe (SFI, por sus siglas en inglés). Ampliando significativamente la comprensión del tipo de ciencia que hacían los anteriores centros e institutos, el SFI está consagrado a las ciencias de la complejidad. Nacen,

organizativa-administrativa-financieramente, las ciencias de la complejidad. La historia del SFI está muy bien y hermosamente narrada en el libro, clásico, de Waldrop. Posteriormente, en Estados Unidos y en Europa primero, y luego también en Japón y la China, surgen otros centros e institutos similares.

Como se aprecia sin dificultad, si tomamos como punto de referencia el SFI, hasta la fecha llevamos alrededor de 30 años trabajando activa, sistemáticamente en complejidad. Es un tiempo breve a escala humana, y aún más en perspectiva histórica. Sin embargo, los logros, los ritmos de desarrollo, los progresos son impresionantes y crecientes. Este libro brinda una mirada sobre estos progresos.

Asistimos, manifiestamente, a una revolución. Para decirlo cognitivamente, en términos de T. Kuhn, se trata de una revolución científica: en el plano teórico y tecnológico al mismo tiempo. Muchos, muchos de nosotros adoptamos –análogamente a lo que sucede en política–, una posición determinada y estamos sin saberlo y sabiéndolo, en el campo equivocado de la revolución, o acaso también, inversamente, en el campo acertado de la revolución (algo así es lo que expresa T. Kuhn en el capítulo 10 de su obra fundamental: *Estructura de las revoluciones científicas*).

Siempre sucede en las revoluciones: la carga de la demostración de la novedad recae sobre quien propone una alternativa, sobre quien abre una nueva puerta, sobre quien avizora un horizonte. Las ciencias de la complejidad son un territorio novedoso; la literatura al respecto es creciente, vertiginosa incluso. Los eventos internacionales, las colecciones de libros, las revistas, los títulos. Y sin embargo, es claro, aún se encuentra lejos –bastante lejos, para ser honestos– de convertirse en un conocimiento normalizado. Todavía es, para emplear la famosa expresión, “nuevo paradigma”; falta bastante para que se convierta en el “paradigma vigente”.

La comunidad de profesores, investigadores y estudiosos e interesados por la complejidad en general es creciente. Sin embargo, todos son complejólogos de primera generación. Es decir, gente que se ha formado en una disciplina, en una ciencia articular, y que, por diversas razones, al cabo, ha accedido a pensar, a trabajar y a vivir en términos de interdisciplinariedad: inter, trans o multidisciplinariedad: para el caso da lo mismo; es decir, de conocimientos transversales, cruzados, integrales, marginales a veces, tangenciales, transversales, y demás metáforas, extraídas habitualmente de la geometría.

Estamos aún en deuda, generacionalmente, con el presente y con el futuro: no existen todavía complejólogos de segunda generación, que serán todos aquellos que se hayan formado –es decir, en, desde pregrado– en ciencias de la complejidad. Previsiblemente, en el futuro inmediato seguiremos siendo, todos, complejólogos de primera generación, hasta tanto no se creen currículos, carreras y programas académicos en complejidad. He aquí un reto formidable, por ejemplo, para las facultades de Educación. A lo sumo, asistimos, en Colombia y en el mundo, a la presencia de materias (cursos, seminarios, etc.) de complejidad, con mayor o menor intensidad y transversalidad. Pero todavía no asistimos a la creación de currículos de pregrado y postgrado enteramente dedicados al trabajo, formación e investigación en ciencias de la complejidad.

El libro presenta la bibliografía, los principales centros de investigación, revistas, *links*, aplicaciones y campos de trabajo que conocemos (y en algunos casos, que tenemos en nuestras casas y bibliotecas personales). Desde luego que toda lista siempre es incompleta. Sencillamente queremos brindar el más completo panorama acerca del estado del trabajo en ciencias de la complejidad.

Cada sección va introducida por un breve comentario de tipo, al mismo tiempo teórico y metodológico. Adicionalmente, hemos creado varios esquemas o diagramas que suministran una visión sintética del tema introducido y, por consiguiente, de la bibliografía pertinente en este estado del arte.

Sección 1 Ciencias de la complejidad

Las ciencias de la complejidad representan una auténtica revolución en el conocimiento, al mejor estilo de las revoluciones científicas estudiadas por T. Kuhn, pero que en realidad son herederas de la tríada G. Bachelard, G. Canguilhem y A. Koyre. Se trata de un grupo de ciencias –que por tanto contienen numerosas teorías, una diversidad de modelos explicativos, una gama amplia de conceptos, en fin, una pluralidad de métodos y lógicas– cuyo tema de base es, para decirlo en términos genéricos: ¿Por qué las cosas son o se vuelven complejas? ¿Qué es, al fin y al cabo, “complejidad”?

A preguntas semejantes, las ciencias de la complejidad no tienen una única respuesta. Este es el primero de los rasgos que las caracterizan: aportan una pluralidad de respuestas. Y sin embargo, cualquier respuesta no vale, y no todas las respuestas son equivalentes.

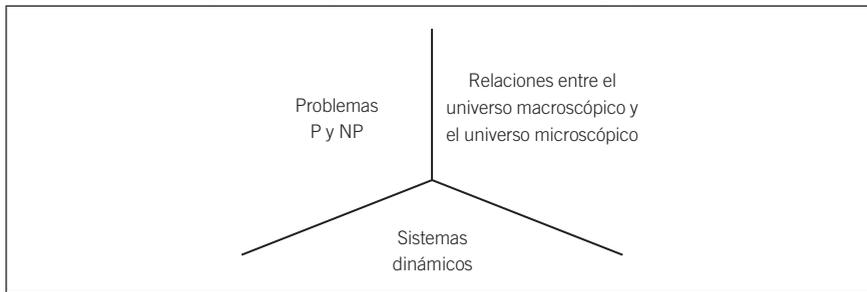
El mundo de las ciencias de la complejidad se ocupa de las *transiciones* orden/desorden; es decir, ¿por qué el orden se rompe? Y también: ¿Cómo es posible que a partir del desorden sea posible el/otro orden?

Asistimos a una construcción fascinante, de muy pocos lustros hasta la fecha, unas cuantas decenas de años. Es posible caracterizar a las ciencias de la complejidad de varias maneras: así, por ejemplo, se ocupan del modo como los fenómenos, sistemas y comportamientos evolucionan y ganan grados de libertad; se trata de sistemas que ganan información aun cuando no (necesariamente) memoria; fenómenos sensibles a las condiciones iniciales, reconociendo que las condiciones iniciales apuntan siempre al presente –en cada caso dado– y que no deben ser confundidas con algo así como “condiciones originarias”; fenómenos que se encuentran en redes –libres de escala, por ejemplo– y cuya topología es esencialmente variable.

No existe, sin embargo, una sola “definición” de complejidad. Al respecto, vale siempre recordar que la buena ciencia –como de hecho también la buena filosofía– no parte de definiciones ni trabaja tampoco con ellas. Si acaso, arriba, al cabo, a definiciones. La buena ciencia trabaja con problemas. Y aquí el problema es “complejidad”. De esta suerte, el estudio de los sistemas, fenómenos y comportamientos que se caracterizan por su complejidad creciente, corresponde exactamente a aquella clase de situaciones en las que

una pluralidad (multiplicidad o diversidad; que es la marca distintiva de la complejidad) no puede ser reducida de ninguna manera a un momento anterior, a una instancia inferior, en fin, a una multiplicidad más elemental o simple. Entonces, con total seguridad, nos encontramos de cara a los temas, problemas, campos, fenómenos y sistemas que conciernen específicamente a las ciencias de la complejidad.

Esquema 2
Ejes de trabajo de las ciencias de la complejidad



Fuente: realizado por los autores

El esquema 2 contiene los tres grandes ejes de trabajo en ciencias de la complejidad. Prefigura, por así decirlo, el mapa –esencialmente abierto– del mundo de la complejidad. Estos ejes son (el orden no importa): la teoría matemática de la complejidad –más propiamente conocida como el conjunto de los problemas **P** versus **N-P**–, las relaciones entre el universo microscópico y el universo macroscópico, y la teoría de los sistemas dinámicos.

Acercas de las relaciones entre el universo microscópico y el universo macroscópico –que constituye, por lo demás, el tema mismo de una de las lógicas no-clásicas (la lógica cuántica)–, es fundamental atender al hecho de que aquí no se trata tanto de magnitudes y tamaños cuanto que de las relaciones entre tiempos. Por ejemplo, escalas nanoscópicas o femtoescalares relativamente a kilómetros o años o siglos.

Estos tres grandes ejes se cruzan entre sí e inauguran el mundo mismo de la complejidad.

1.1. Libros de recuentos periodísticos acerca de ciencias de la complejidad

El periodismo científico cumple, indudablemente, una función fundamental en las sociedades democráticas. Hay países, como Inglaterra, notablemente, en donde las discusiones sobre ciencia están ya tan arraigadas que incluso hay espacio para la presentación de la *mala ciencia* (*bad science*). Las universidades de Inglaterra tienen espacios sobre la mala ciencia, y aun periódicos muy serios como *The Guardian* disponen de un espacio diario o semanal para ello: para discutir uno de los problemas más difíciles en ciencia: los criterios de demarcación, o también, la pseudociencia.

Lo libros referidos inmediatamente son trabajos periodísticos sobre complejidad. Los hay sumamente serios, como el libro de Waldrop o el de Gleick, y altamente peligrosos como el de Horgan.

Gleick, J. (1987). *Caos: la creación de una ciencia*. Barcelona: Seix Barral.

Horgan, J. (1998). *El fin de la ciencia: los límites del conocimiento en el declive de la era científica*. Barcelona: Paidós.

Johnson, S. (2003). *Sistemas emergentes: o que tienen en común hormigas, neuronas, ciudades y software*. Madrid: Turner.

Lewin, R. (1992). *Complexity: Life at the Edge of Chaos*. New York: Collier Books.

Waldrop, M. (1992). *Complexity: The Emerging Science at the Edge of Order and Chaos*. New York: Simon and Schuster.

1.2. Textos panorámicos, clásicos e introductorios sobre complejidad

Existe una dificultad para el acceso a las ciencias de la complejidad. Se trata del hecho de que la inmensa mayoría de la bibliografía se encuentra en inglés –en contraste, notablemente con la bibliografía sobre “pensamiento complejo” (E. Morin), que ya ha sido traducida al español (y que numerosos epígonos de Morin son hispanohablantes)–. Pero, con seguridad, por encima de esta

circunstancia, es el hecho de que el lenguaje de las ciencias de la complejidad aún está altamente permeado por conceptos, herramientas, enfoques provenientes de las matemáticas, la física, la química, la biología y los sistemas computacionales, principalmente.

La razón principal para esta circunstancia –ineludible– estriba en el hecho de que las ciencias de la complejidad nacieron y durante un tiempo largo se alimentaron de las ciencias más sólidas, con mayor prestigio, las más seguras y con mejores apoyos de diverso tipo. Pero es igualmente cierto que las ciencias de la complejidad vienen abriéndose, rápidamente, a las llamadas ciencias sociales y humanas.

Ya lo decía H. Pagels: las ciencias de la complejidad se desarrollaron a partir de las ciencias naturales y/o positivas debido, sencillamente, a que los sistemas físicos son los más simples que hay, y de una complejidad bastante menor a la de las ciencias sociales y humanas.

- Baofu, P. (2007). *The Future of Complexity: Conceiving a Better Way to Understand Order and Chaos*. Singapore: World Scientific.
- Bar-Yam, Y. (2004). *Making Things Work. Solving Complex Problems in A Complex World*. NECSI-Knowledge Press.
- Bar-Yam, Y. (1997). *Dynamics of Complex Systems*. Massachusetts: Addison-Wesley.
- Bertuglia C.S. & Vaio F. (2005). *Nonlinearity, Chaos, and Complexity: The Dynamics of Natural and Social Systems*. Oxford: Oxford University Press.
- Casti, J. (1994). *Complexification: Explaining a Paradoxical World Through the Science of Surprise*. New York: Harper Collins.
- Cowan, G., Pines D., Meltzer, D. (1999). *Complexity: Metaphors, Models, and Reality*. Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity. Westview Press.
- Erdi, P. (2008). *Complexity Explained*. Berlin: Springer-Verlag.
- Gros, C. (2008). *Complex and Adaptive Dynamical Systems: A Primer*. Berlin: Springer-Verlag.
- Johnson, N. (2007). *Two's Company, Three is Complexity: A simple guide to the Science of all Sciences*. Oxford: Oneworld.

- Mainzer, K. (2007). *Thinking in Complexity: The Computational Dynamics of Matter, Mind and Mankind* (5th ed.). Berlin: Springer Verlag.
- Mitchell, M. (2009). *Complexity: A Guided Tour*. Oxford: Oxford University Press.
- Nicolis, G., & Nicolis, C. (2007). *Foundations of Complex Systems: Nonlinear Dynamics, Statistical Physics, Information and Prediction*. Singapore: World Scientific.
- Pagels, H. (1991). *Los sueños de la razón: el ordenador y los nuevos horizontes de las ciencias de la complejidad*. Barcelona: Gedisa.
- Scott, A. C. (2007). *The Nonlinear Universe. Chaos, Emergence, Life*. Springer Verlag
- Solé, R., Bascompte, J., Delgado, J., Luque, B., & Manrubia, S. (1996). Complejidad en la frontera del caos. *Investigación y Ciencia*, 14-21.
- Wagensberg, J. (2004). *La rebelión de las formas. O cómo perseverar cuando la incertidumbre aprieta* (2^a ed.). Barcelona: Tusquets.
- Wagensberg, J. (2003). *Ideas sobre la complejidad del mundo*. Colección Fábula. Barcelona: Tusquets.
- Wolfram, S. (2002). *A New Kind of Science*. Champaign: Wolfram Research.
- Wolfram, S. (1996). *Cellular Automata and Complexity*. Collected Papers. Addison Wesley Publishing Co.

1.3. Textos técnicos sobre diversos aspectos de la complejidad

Hay un fenómeno que es absolutamente imposible de omitir y que, mejor aún, merece un lugar por sí mismo. Se trata de la *Enciclopedia de complejidad*, editada por Meyers, que se menciona a continuación. Ciertamente, algo más de la mitad de la enciclopedia no es sobre complejidad, en el sentido riguroso de la palabra. La mayor parte corresponde a enfoques sistémicos.

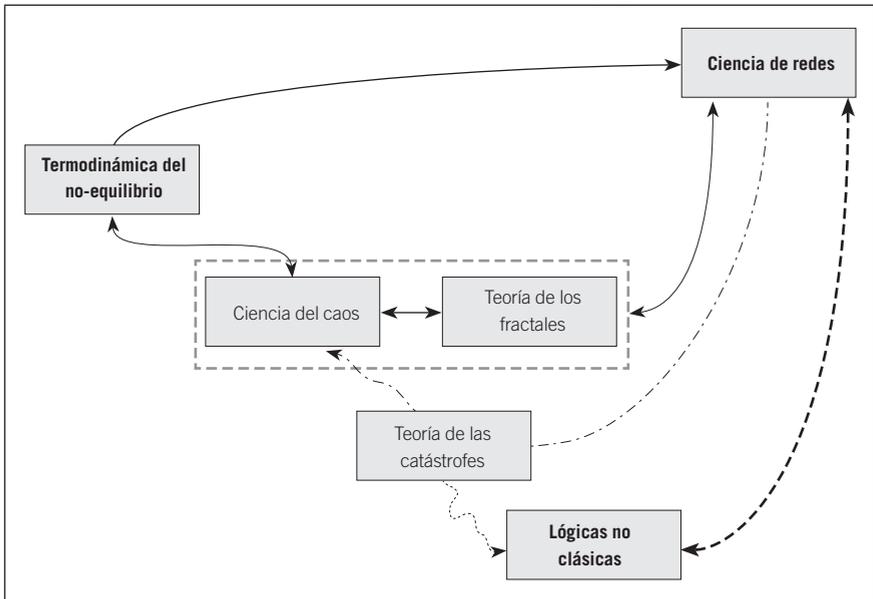
Es evidente que existe un parentesco fuerte entre áreas como la cibernética (de primer y de segundo orden), los enfoques sistémicos, el pensamiento complejo y las ciencias de la complejidad. Pero es igualmente manifiesto que es necesario trabajar en un criterio de demarcación –una expresión que la filosofía de la ciencia remonta hasta los trabajos pioneros de Reichenbach, por ejemplo–. Nosotros nos encontramos trabajando en este criterio, pero eso es tema de un texto aparte.

- Albeverio, S., Andrey, D., Giordano, P., & Vancheri, A. (Eds.). (2008). *The Dynamics of Complex Urban Systems: An Interdisciplinary Approach*. Heidelberg: Physica-Verlag.
- Badii, R., & Politi, A. (1997). *Complexity. Hierarchical Structures and Scaling in Physics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Bak, P. (1996). *How Nature Works. The Science of Self-Organized Criticality*. New York: Springer Verlag.
- Balanov, A., Janson, N., Postnov, D., & Sosnovtseva, O. (2009). *Synchronization From Simple to Complex*. Berlin: Springer-Verlag.
- Chaisson, E. J. (2001). *Cosmic Evolution. The Rise of Complexity in Nature*. Harvard, MA/London: Harvard University Press.
- Ivancevic, V., & Ivancevic, I. (2007). *Complex Dynamics: Advanced System Dynamics in Complex Variables*. Berlin: Springer-Verlag.
- Lloyd, S. (2006). *Programming the Universe: a Quantum Computer Scientist Takes on the Cosmos*. New York: Alfred A. Knopf.
- Meyers, R. (Ed.). (2009). *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*. New York: Springer-Verlag.
- Minai, A., & Bar-Yam, Y. (Eds.). (2008). *Unifying Themes in Complex Systems IV: Proceedings of the Fourth International Conference on Complex Systems*. Berlin: Springer-Verlag.
- Minai, A., & Bar-Yam, Y. (Eds.). (2006). *Unifying Themes in Complex Systems IIIA: Overview: Proceedings of the Third International Conference on Complex Systems*. Berlin: Springer-Verlag.
- Minai, A., & Bar-Yam, Y. (Eds.). (2006). *Unifying Themes in Complex Systems IIIB: New Research: Proceedings of the Third International Conference on Complex Systems*. Berlin: Springer-Verlag.
- Schuster, A. (Ed.). (2008). *Robust Intelligent Systems*. Berlin: Springer-Verlag.
- Shan, Y., & Shan, A. (2008). *Applications of Complex Adaptive Systems*. Hershey: IGI Publishing.
- Zhou, J. (Ed.). (2009). *Complex Sciences: First International Conference, Complex 2009, Shanghai, China, February 23-25, 2009*. Berlin: Springer-Verlag.

1.4. Estado actual de las ciencias de la complejidad

Originalmente, las ciencias de la complejidad eran –aritméticamente– seis, incluyendo la hipótesis que venimos trabajando según la cual las lógicas no-clásicas son una de las ciencias de la complejidad. Pues bien, el esquema 3 tiene la función de mostrar, más allá de la enumeración o presentación general de las ciencias de la complejidad, el estado actual del trabajo y de la investigación en este campo.

Esquema 3
Estado actual de las ciencias de la complejidad



Fuente: realizado por los autores

Las ciencias que aparecen en **negrita** –termodinámica del no-equilibrio (TNE), ciencia de redes y las lógicas no-clásicas– son aquellas que dominan, si cabe la expresión, el trabajo de los complejólogos. Existe una implicación recíproca muy fuerte entre caos y fractales. Sin embargo, ambas han llegado a integrarse en la termodinámica del no equilibrio. Es como decir que actualmente no existen proyectos de investigación, libros serios o artículos sobre caos. La ciencia del caos, por así decirlo, ya dio lo que podía dar. Y precisamente por ello, ha llegado a subsumirse en la TNE. Esta afirmación,

sin embargo, merece matizarse cuando se piensa en el caos cuántico y subcuántico, un tema que permanece abierto hasta la fecha, en espera de una mejor o mayor cristalización.

La teoría de catástrofes desaparece debido a la fuerza lógica del caos –tomando lógica en el sentido de la filosofía de la ciencia–, y prácticamente ha desaparecido como teoría matemática. En cuanto lenguaje, sencillamente llega a integrarse o a subsumirse en las lógicas no-clásicas (LNC), por razones obvias.

Las flechas puntuadas entre la LNC y la ciencia de redes hacen referencia, en el estado actual de la investigación, a una relación indirecta. Por el contrario, existe una relación directa entre la TNE y la ciencia de redes. Por lo demás, una parte de la ciencia del caos y de los fractales ha llegado también a incluirse en la ciencia de redes, como se aprecia, sin dificultad del estudio de percolaciones, fenómenos de cascadas, y las relaciones entre teoría de grafos, topología y redes complejas.

En cualquier caso, este esquema debe ser tomado como un mapa de las ciencias de la complejidad que contiene, en su base, tanto territorios irregulares como valles, si cabe la metáfora.

1.4.1. Complejidad y termodinámica del no equilibrio

Cronológicamente, la primera de las ciencias de la complejidad fue la termodinámica del no-equilibrio, desarrollada por I. Prigogine. En sentido estricto, la termodinámica clásica y la termodinámica del no-equilibrio son una sola y misma ciencia que comprende dos momentos: el clásico, que pivota alrededor de la noción de equilibrio –y por tanto, ulteriormente, de muerte–, y la nueva –cuyo centro es el no-equilibrio, y en consecuencia la vida–.

Gell-Mann, M., & Tsallis, C., (Eds.), (2004). *Nonextensive Entropy. Interdisciplinary Applications*. Oxford: Oxford University Press.

Kondepudi, D., & Prigogine, I. (1998). *Modern Thermodynamics. From Heat Engines to Dissipative Structures*. John Wiley & Sons.

Nicholis, G., & Prigogine, I. (1977). *Self-Organization in Nonequilibrium Systems*. New York: Wiley-Interscience.

- Nicholis, G., & Prigogine, I. (1994). *La estructura de lo complejo. En el camino hacia una nueva comprensión de las ciencias*. Madrid: Alianza.
- Prigogine, I. (1980). *From Being to Becoming. Time and Complexity in the Physical Sciences*. San Francisco: W. H. Freeman & Co.
- Prigogine, I. (1977). *Nobel Lecture in Chemistry. Time, Structure and Fluctuations*, s.d.
- Prigogine, I. (1962). *Nonequilibrium Statistical Mechanics*. New York: Wiley.

1.4.2. Complejidad y caos

Históricamente, el caos –primero teoría, luego ciencia– fue desarrollado por E. Lorenz en los años 1962-1964. Pero hubo de pasar muchos años para que fuera reconocida su importancia. Esta historia está muy bien narrada por J. Gleick. El estudio central del caos estriba en la identificación de atractores extraños (un concepto acuñado por D. Ruelle). Inicialmente, el caos permanece como una teoría de sistemas deterministas. Al cabo del tiempo, su interés se vuelca hacia el caos indeterminista o subcuántico.

- Briggs & Peat (1999). *Las siete leyes del caos*. Barcelona: Tusquets.
- Cohen, J., & Stewart, I. (1994). *The Collapse of Chaos*. New York: Penguin Books.
- Cramer, F. (1993). *Chaos and Order: The Complex Structure of Living Systems*. New York: VCH Publishers.
- Gleick, J. (1987). *Caos: la creación de una ciencia*. Barcelona: Seix Barral.
- Kellert, S. (1993). *In the Wake of Chaos: Unpredictable Order in Dynamical Systems*. Chicago: Chicago University Press.
- Li, Z., Halang, W., & Chen, G. (2006). *Integration of Fuzzy Logic and Chaos Theory*. Berlin: Springer-Verlag.
- Lorenz, E. (1993). *The Essence of Chaos*. Seattle, WA: University of Washington Press.
- Reynoso, C. (2006). *Complejidad y caos: una exploración antropológica*. Buenos Aires: SB.
- Ruelle, D. (1991). *Chance and Chaos*. Princeton, NJ: Princeton University Press.

1.4.3. Complejidad y fractales

La geometría de fractales es, históricamente hablando, la tercera de las ciencias de la complejidad. Existe una fuerte implicación recíproca entre caos y fractales. La razón es que todo atractor extraño tiene en su base una dimensión fractal. Los fractales han resultado de inmensa ayuda en la medición de numerosos sistemas y comportamientos, en ciencias de la salud y economía, en sistemas sociales y en astronomía, por ejemplo.

Barnsley, M. (1993). *Fractals Everywhere* (2nd. ed). Cambridge, MA.: Academic Press.

Mandelbrot, B. (1997). *La geometría fractal de la naturaleza*. Barcelona: Tusquets.

Mandelbrot, B. (1996). *Los objetos fractales*. Barcelona: Tusquets.

Mandelbrot, B., & Hudson, R. (2006). *Fractales y finanzas: una aproximación matemática a los mercados: arriesgar, perder y ganar*. Metatemas 93. Barcelona: Tusquets.

1.4.4. Complejidad y catástrofes

La teoría de catástrofes nace y permanece vinculada durante un tiempo largo a un campo desarrollado también por R. Thom, el cobordismo. Hay que decir que en cuanto teoría matemática, la teoría de catástrofes prácticamente desaparece. La razón es que, relativamente al caos, resulta una teoría muy costosa –en términos de G. de Ockahm–. En efecto, mientras que el caos trabaja los sistemas dinámicos con base en tres conceptos –atractores fijos, atractores periódicos y atractores extraños–, la teoría de catástrofes proponía siete modelos fundamentales. “Catástrofe” es el término empleado para designar sencillamente cambios súbitos, imprevistos, irreversibles. A pesar de que desaparece como una teoría matemática, Thom mismo expresa que la teoría permanece como un *lenguaje*, a saber: el lenguaje que expresa o en el que se estudian cambios súbitos e irreversibles.

- Thom, R. (1997). *Estabilidad estructural y morfogénesis. Ensayo de una teoría general de los modelos*. Barcelona: Gedisa.
- Thom, R. (1990). *Esbozo de una semióptica. Física aristotélica y teoría de las catástrofes*. Barcelona: Gedisa.
- Zeeman, E. C. (1977). *Catastrophe Theory. Selected Papers, 1972-1977*. Reading, MA: Addison Wesley Publishing Co.

1.4.5. Complejidad y redes

La ciencia de redes complejas, desarrollada originariamente por D. Watts, L. Barabasi y S. Strogatz entre los años 2001 y 2003, constituye la quinta de las ciencias de la complejidad. Un rasgo fundamental de las ciencias de la complejidad estriba exactamente en este punto: a la pregunta ¿qué es complejidad?, o ¿por qué sucede la complejidad?, por ejemplo, las ciencias de la complejidad no aportan –en marcado contraste con la ciencia clásica– una sola respuesta. Por el contrario, se aportan diversas respuestas. Lo que es importante tener en cuenta, sin embargo, es que no es verdad que cualquier respuesta sea posible o aceptada.

Digamos, *en passant*, que no por ser catálogo o por trabajar en redes complejas, por ejemplo, se es entonces necesariamente complejólogo. Pero al trabajar en complejidad entonces sí es posible atravesar por termodinámica del no-equilibrio, caos, fractales, catástrofes o redes complejas.

- Barabási, A.-L. (2003). *Linked: How Everything Is Connected to Everything Else and What It Means for Business, Science, and Everyday Life*. Plume.
- Barrat, A., Barthélemy, M., & Vespignani, A. (2008). *Dynamical Processes on Complex Networks*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Ganguly, N., Deutsch, A., & Mukherjee, A. (Eds.) (2009). *Dynamics On and Of Complex Systems: Applications to Biology, Computer Science and the Social Sciences*. Boston: Springer-Birkhauser.
- Gross, T., & Sayama, H. (Ed.). (2009). *Adaptive Networks: Theory, Models and Applications*. Berlin: Springer-Verlag.

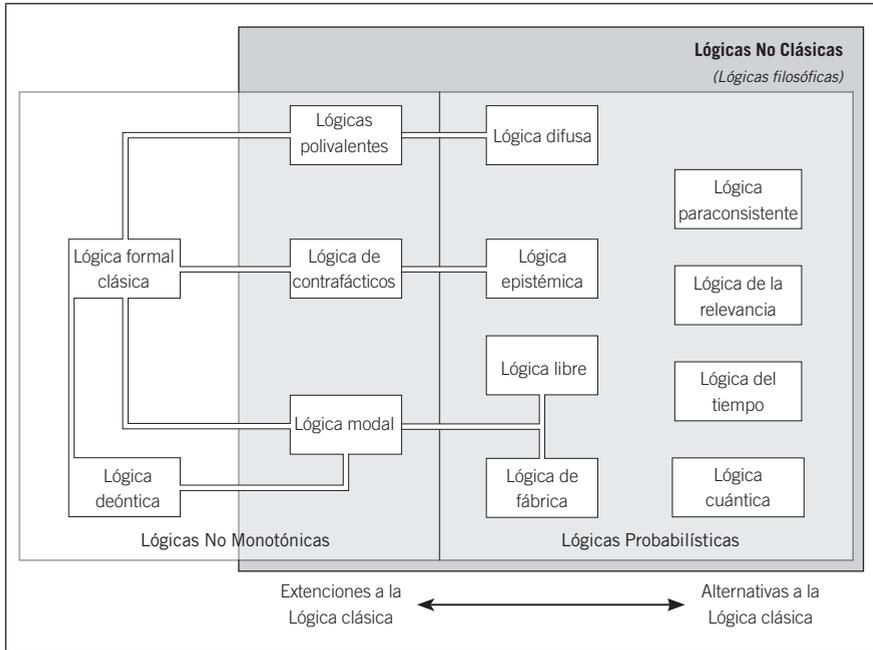
- Johnson, N. (2007). *Two's Company, Three is Complexity. A Simple Guide to the Science of All Sciences*. Oxford: One World.
- Kocarev, L., & Vattay, G. (Eds.). (2005). *Complex Dynamics in Communication Networks*. Berlin: Springer-Verlag.
- Reichardt, J. (2009). *Structure in Complex Networks*. Berlin: Springer Verlag.
- Solé, R. (2009). *Redes complejas: del genoma a Internet*. Barcelona: Tusquets.
- Strogatz, S. (2003). *Sync. How Order Emerges from Chaos in the Universe, Nature, and Daily Life*. New York: Theia.
- Watts, D. J. (2003). *Six Degrees. The Science of a Connected Age*. New York/London: W. W. Norton & Co.
- Wu, C. W. (2007). *Synchronization in Complex Networks of Nonlinear Dynamical Systems*. Singapore: World Scientific.

1.4.6. Complejidad y lógicas no-clásicas

La ciencia en general siempre ha estado acompañada o se ha fundado en la lógica. Sin embargo, en el contexto de las ciencias de la complejidad, hablamos de y trabajamos con lógicas no-clásicas. El esquema 4 brinda una visión de algunas de ellas y las relaciones que tienen entre sí.

Las lógicas no clásicas ponen, de entrada, claramente sobre la mesa, a plena luz del día, una idea escandalosa cuando se la mira con los ojos de la tradición occidental: no hay una única lógica de la verdad (*there is no one true logics*). Ningún autor lo ha establecido de esta manera: presentamos la hipótesis según la cual las lógicas no-clásicas son una de las ciencias de la complejidad. Esta hipótesis cuenta ya con algunos avances de parte nuestra.

Esquema 4
Lógicas no clásicas (o lógicas filosóficas)



Fuente: realizado por los autores

- Beal, J. C., & Restall, G. (2006). *Logical pluralism*. Oxford: Oxford University Press.
- Gardies, J.-L. (1979). *Lógica del tiempo*. Madrid: Paraninfo.
- Haack, S. (1996). *Deviant Logic, Fuzzy Logic. Beyond the Formalism*. Chicago & London: The University of Chicago Press.
- Hintikka, J. (2007). *Socratic Epistemology. Explorations of Knowledge-Seeking by Questioning*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Jaquette, D., (Ed.) (2007). *A Companion to Philosophical Logic*. Blackwell Publishing.
- Kyburg, Jr., H. E., & Teng, Ch. M. (2001). *Uncertain Inference*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Mares, E. D. (2007). *Relevant Logic. A Philosophical Interpretation*. Cambridge: Cambridge University Press.

- Palau, G. (2002). *Introducción filosófica a las lógicas no-clásicas*. Buenos Aires: Gedisa-UBA.
- Palau, G., et al. (2004). *Lógicas condicionales y razonamiento de sentido común*. Buenos Aires: Gedisa-UBA.
- Peña, L. (1993). *Introducción a las lógicas no clásicas*. México: UNAM.
- Priest, G. (2008). *An Introduction to Non-Classical Logic*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Prior, A. N. (2003). *Papers on Time and Tense*. Oxford: Oxford University Press.
- Woods, J. (2003). *Paradox and Paraconsistency. Conflict Resolution in the Abstract Sciences*. Cambridge: Cambridge University Press.

1.5. Emergencia y autoorganización

Indudablemente, los conceptos de emergencia y de autoorganización constituyen pilares fundamentales de las ciencias de la complejidad. Diversos autores, antes que (pre)suponerlos como conceptos o categorías de complejidad, se han dado a la tarea de explicar exactamente en qué consiste la emergencia y cómo surge y qué hace la autoorganización. Los dos autores más destacados en este sentido son J. Holland y S. Kauffman.

- Aziz-Alaoui, M. A., & Bertelle, C. (Eds.). (2009). *From System Complexity to Emergent Properties*. Berlin: Springer-Verlag.
- Bedau, M., & Humphreys, P. (Eds.). (2008). *Emergence: Contemporary Readings in Philosophy and Science*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Bertelle, C., Duchamp, G., & Kadri-Dahmani, H. (Eds.). (2009). *Complex Systems and Self-Organization Modelling*. Berlin: Springer-Verlag.
- Davies, P. (Ed.). (1989). *The New Physics*. New York: Cambridge University Press.
- Holland, J. (1998). *Emergence. From Chaos to Order*. Reading, MA: Addison-Wesley.
- Holland, J. (1995). *Hidden Order: How Adaptation Builds Complexity*. Reading, MA: Perseus Books.

- Ishiwata, S., & Matsunaga, Y. (Eds.). (2008). *Physics of Self-Organization Systems*. Singapore: World Scientific.
- Johnson, S. (2003). *Sistemas emergentes: o que tienen en común hormigas, neuronas, ciudades y software*. Madrid: Turner.
- Kauffman, S. (2000). *Investigations*. Oxford: Oxford University Press.
- Kauffman, S. (1995). *At Home in the Universe. The Search for the Laws of Self-Organization*. Oxford: Oxford University Press.
- Kauffman, S. (1993). *The Origins of Order. Self-Organization and Selection in Evolution*. Oxford: Oxford University Press.
- Prokopenko, M. (Ed.). (2008). *Advances in Applied Self-organizing Systems*. Berlin: Springer-Verlag.

Sección 2

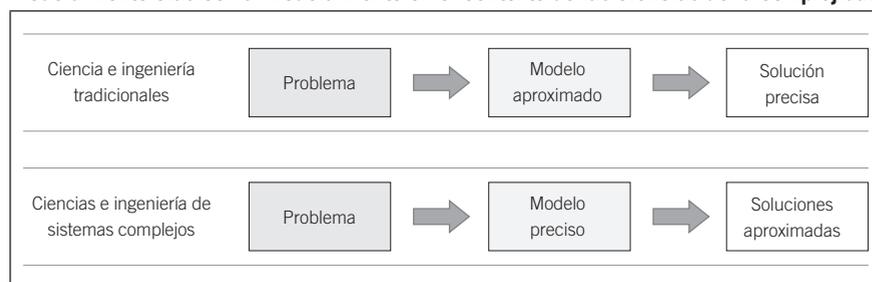
Modelamiento y simulación de sistemas complejos

El modelamiento y (sobre todo) la simulación son específicos de los sistemas de complejidad creciente.² Esta idea requiere aún una incorporación y una elaboración por parte de quienes se inician en el estudio y el trabajo en profundidad con la complejidad.

En el plano tradicional de la ciencia, la construcción de modelos y la ulterior solución de problemas consistieron en la elaboración de un modelo aproximado, capaz (en apariencia) de simplificar la realidad, al cual le correspondía siempre, en cada ocasión, una solución única. El fundamento de este tipo de modelamiento se basó, por ejemplo, en la mecánica clásica, la lógica formal clásica, el cálculo, las ecuaciones diferenciales o la geometría euclidiana. Pues bien, pese a que este tipo de modelos suelen admitir soluciones precisas (=exactas), estas últimas se corresponden usualmente con el modelo, pero no con el problema real al que se refieren. Es así como la ciencia clásica nos llevó, cada vez más, a una sobresimplificación de la realidad como la forma única de comprensión y actuación en el mundo.

Esquema 5

Modelamiento clásico vs. modelamiento en el contexto de las ciencias de la complejidad



Fuente: adaptado y ampliado a partir de Michalewicz et al. (2007)

² Ciertamente, en el sentido más amplio e incluyente de la palabra, el modelamiento se ha empleado en toda la historia de la ciencia, sólo que en el contexto de la complejidad toma matices diferentes y nuevos. De otro lado, y pese a que se pueden simular fenómenos y dinámicas simples, la simulación cobra realmente sentido cuando de sistemas complejos se trata.

En el marco de las ciencias de la complejidad, la idea es completamente contraria. Se trata de construir un modelo del problema que se tiene entre manos, tan preciso como sea posible; por ejemplo, a través de técnicas tales como los autómatas celulares, el modelamiento y la simulación basados en agentes o las metaheurísticas. Un modelo semejante permite obtener no una, sino *varias* soluciones referidas no al modelo (que está ajustado tanto como se puede a la realidad), sino al problema real que se está abordando. Se habla entonces de múltiples soluciones o, dicho técnicamente, de un espacio de soluciones. El modelamiento planteado en estos términos permite abordar fenómenos complejos sin la necesidad eliminar la incertidumbre ni de linealizarlos.

- Axelrod, R. (1997). *The Complexity of Cooperation. Agent-Based Models of Competition and Collaboration*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Awrejcewicz, J. (Ed.). (2009). *Modeling, Simulation and Control of Nonlinear Engineering: State-of-the-Art, Perspectives and Applications*. Berlin: Springer-Verlag.
- Bandini, S., Manzoni, S., & Vizzari, G. (2009). Agent Based Modeling and Simulation. In: R. Meyers (Ed.), *Encyclopedia of Complexity and Systems Science* (pp. 184-97). Berlin: Springer-Verlag.
- Barandiaran, X., & Moreno, A. (2007). Modelos simulados, mediación virtual para el pensamiento complejo: lecciones filosóficas desde la vida artificial. *IAS-Research*, 1-7.
- Billari, F., Fent, T., Prskawetz, A., & Scheffran, J. (2006). *Agent-Based Computational Modelling: Applications in Demography, Social, Economic and Environmental Science*. Berlin: Physica-Verlag.
- Boccaro, N. (2004). *Modeling Complex Systems*. Berlin: Springer-Verlag.
- Bock, H., Kostina, E., Phu, H., & Rannacher, R. (Eds.). (2006). *Modeling, Simulation and Optimization of Complex Systems*. Berlin: Springer-Verlag.
- Bonabeau, E. (2002). Agent-Based Modeling: Methods and Techniques for Simulating Human Systems. *Proc. National Academy of Sciences*, 99 (3), 7280-7.

- Engquist, B., Lötstedt, P., & Runborg, O. (Eds.). (2009). *Multiscale Modeling and Simulation in Science*. Berlin: Springer-Verlag.
- Ehrentreich, N. (2008). *Agent-Based Modeling: The Santa Fe Institute Artificial Stock Market Model Revisited*. Berlin: Springer-Verlag.
- Gilbert, N., & Troitzsch, K. (2005). *Simulation for the Social Scientist*. Berkshire: Open University Press.
- Gintis, H. (2000). *Game Theory Evolving. A Problem-Centered Introduction to Modeling Strategic Interaction*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Halgamuge, S., & Wang, L. (Eds.). (2005). *Computational Intelligence for Modelling and Prediction*. Berlin: Springer-Verlag.
- Ilachinsky, A. (2004). *Artificial War: Multiagent-Based Simulation of Combat*. Singapore: World Scientific.
- Ilachinski, A. (2001). *Cellular Automata: a Discrete Universe*. Singapore: World Scientific.
- Ioannou, P., & Pitsillides, A. (Eds.). (2008). *Modeling and Control of Complex Systems*. Boca Raton: CRC Press.
- Macal, C. (2009). Agent Based Modeling and Artificial Life. In: R. Meyers (Ed.), *Encyclopedia of Complexity and Systems Science* (pp. 112-31). New York: Springer-Verlag.
- Maldonado, C. E., & Gómez Cruz, N. (2010). *Modelamiento y simulación de sistemas complejos (cuaderno de trabajo)*. Bogotá: Universidad del Rosario.
- Pagels, H. (1991). *Los sueños de la razón: el ordenador y los nuevos horizontes de las ciencias de la complejidad*. Barcelona: Gedisa.
- Ríos Insúa, D., Ríos Insúa, S., Jiménez, J. M., & Jiménez Martín, A. (2009). *Simulación. Métodos y aplicaciones* (2ª ed.). México: Alfaomega.
- Schiff, J. (2008). *Cellular Automata: a Discrete View of the World*. Honoken, NJ: John Wiley & Sons.
- Wagensberg, J. (2003). *Ideas sobre la complejidad del mundo*. Colección Fábula. Barcelona: Tusquets.

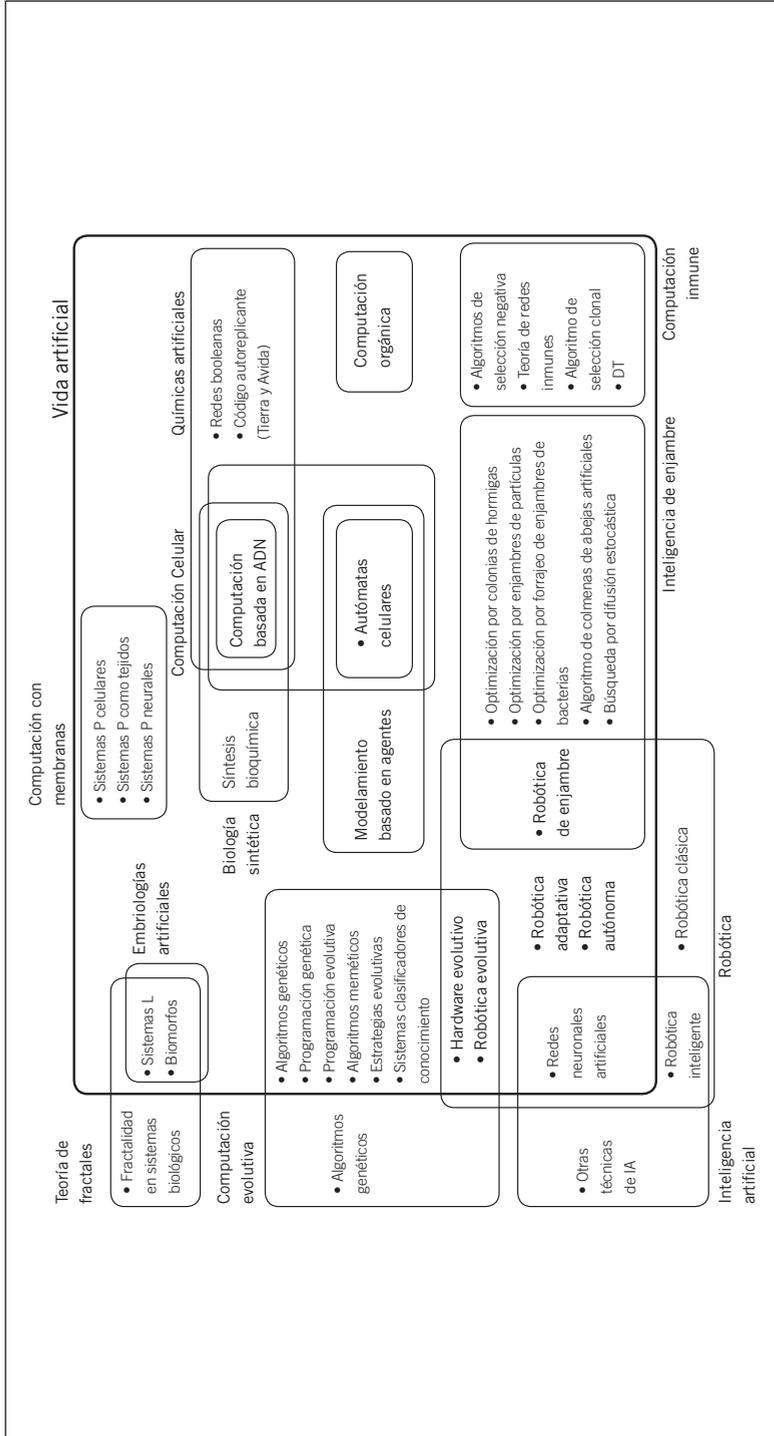
2.1. Modelamiento y simulación de sistemas biológicos, sistemas inspirados biológicamente y vida artificial

Dentro del modelamiento y la simulación en general, hay tres fenómenos conspicuos que brillan con luz propia: los sistemas biológicos, los sistemas inspirados en la biología y la vida artificial. Cabe incluso –y en eso hemos venido trabajando– sostener la hipótesis de que la vida artificial puede y debe ser comprendida como una de las ciencias de la complejidad.

La vida artificial trabaja en tres planos complementarios: i) el modelamiento y la simulación de sistemas biológicos (sección actual), ii) la construcción de sistemas (acaso ingenieriles) capaces de evolucionar, aprender y adaptarse en entornos cambiantes (sección 3), y iii) el estudio de las capacidades de cómputo de los sistemas biológicos y su implementación como nuevas arquitecturas y modelos de computación (sección 4). Un panorama amplio y a la vez una síntesis propuesta de la investigación y el trabajo en vida artificial son presentados en el esquema 6. Allí se muestra la multiplicidad de líneas de investigación, metodologías y enfoques propios de la vida artificial, así como algunas de sus relaciones con campos cruzados y cercanos como la inteligencia artificial y la teoría de fractales. Cada uno de los sub-campos de la vida artificial es, por sí solo, una línea de investigación en crecimiento constante.

Esquema 6

Síntesis de la investigación en vida artificial



Fuente: realizado por los autores

- Abbass, H., Bossomaier, T., & Wiles, J. (Eds.). (2005). *Recent Advances in Artificial Life*. Singapore: World Scientific.
- Adamatzky, A., & Komosinski, M. (2009). *Artificial Life Models in Hardware*. London: Springer-Verlag.
- Adamatzky, A., & Komosinski, M. (Eds.). (2005). *Artificial Life Models in Software*. Londres: Springer-Verlag.
- Adami, C. (1998). *Introduction to Artificial Life*. New York: Springer Verlag.
- Adami, C., Belew, R., Kitano, H., & Charles, T. (Eds.). (1998). *Artificial Life VI: Proceedings of the Sixth International Conference on Artificial Life*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Almeida, F., Mateus, L., Costa, E., Harvey, I., & Coutinho, A. (Eds.). (2007). *Advances in Artificial Life: 9th European Conference, ECAL 2007, Lisbon, Portugal, September, 2007. Proceedings*. Berlin: Springer-Verlag.
- Artmann, S., & Dittrich, P. (Eds.). (2006). *Explorations in the Complexity of Possible Life: Abstracting and Synthesizing the Principles of Living Systems*. Berlin: AKA.
- Ball, P. (1999). *The Self-Made Tapestry: Pattern Formation in Nature*. Oxford: Oxford University Press.
- Banzhaf, W., Christaller, T., Dittrich, P., Kim, J., & Ziegler, J. (Eds.) (2003). *Advances in Artificial Life: 7th European Conference, ECAL 2003, Dortmund, Germany, September, 2003, Proceedings*. Berlin: Springer-Verlag.
- Banzhaf, W., & Eeckman, F. (Eds.). (1995). *Evolution and Biocomputation: Computational Models of Evolution*. Berlin: Springer-Verlag.
- Bedau, M. (2007). Artificial life. In: M. Matthen, & C. Stephens (Eds.), *Handbook of the Philosophy of Biology* (Vol. 3, pp. 585-603). Amsterdam: Elsevier.
- Bedau, M. (2003a). Artificial Life. In: L. Floridi (Ed.), *The Blackwell Guide to the Philosophy of Information and Computing* (pp. 197-211). Malden, MA: Blackwell Publishing.
- Bedau, M. (2003b). Artificial Life: Organization, Adaptation and Complexity from the Bottom-Up. *Trends in Cognitive Sciences*, 7 (11), 505-12.
- Bedau, M. (1998). Philosophical Content and Method of Artificial Life. In T. Bynum & J. Moor (Eds.), *The Digital Phoenix: How Computers are Changing Philosophy* (pp. 135-52). Oxford: Blackwell.

- Bedau, M. (1992). Philosophical Aspects of Artificial Life. In: F. Varela, & P. Bourguin (Eds.), *Towards A Practice of Autonomous Systems* (pp. 494-503). Cambridge, MA: MIT Press.
- Bedau, M., McCaskill, J., Packard, N., & Rasmussen, S. (Eds.). (2000). *Artificial Life VII: Proceedings of the Seventh International Conference on Artificial Life*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Bedau, M., McCaskill, J., Packard, N., Rasmussen, S., Adami, C., Green, D., et al. (2000). Open Problems in Artificial Life. *Artificial Life*, 6 (4), 363-76.
- Boden, M. (Ed.). (1996). *The Philosophy of Artificial Life*. Oxford: Oxford University Press.
- Bonabeau, E., & Theraulaz, G. (1995). Why Do We Need Artificial Life? In: C. Langton (Ed.), *Artificial Life: An Overview* (pp. 303-25). Cambridge: MIT Press.
- Brooks, R., & Maes, P. (Eds.). (1994). *Artificial Life IV: Proceedings of the Fourth International Workshop on the Synthesis and Simulation of Living Systems*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Bullock, S., Noble, J., Watson, R., & Bedau, M. (Eds.) (2008). *Artificial Life XI: Proceedings of the Eleventh International Conference on the Simulation and Synthesis of Living Systems*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Capcarrere, M., Freitas, A., Bentley, P., Johnson, C., & Timmis, J. (Eds.). (2005). *Advances in Artificial Life: 8th European Conference, ECAL 2005, Canterbury, UK, September, 2005. Proceedings*. Berlin: Springer-Verlag.
- Darley, V. (1994). Emergent Phenomena and Complexity. In R. Brooks, & P. Maes (Eds.), *Artificial Life IV: Proceedings of the Fourth International Workshop on the Synthesis and Simulation of Living Systems* (pp. 411-16). Cambridge, MA: MIT Press.
- Emmeche, C. (1998). *Vida simulada en el ordenador: la ciencia naciente de la vida artificial*. Barcelona: Gedisa.
- Emmeche, C. (1994). Is Life as a Multiverse Phenomenon? In C. Langton (Ed.), *Artificial Life III, SFI Studies in the Science of Complexity* (Vol. XVII, pp. 553-68). Reading, MA: Addison-Wesley.
- Fernández, J., & Moreno, A. (1992). *Vida artificial*. Madrid: Eudema.
- Floreano, D., Nicoud, J.-D., & Mondada, F. (Eds.). (1999). *Advances in Artificial Life: 5th European Conference, ECAL '99, Lausanne, Switzerland, September, 1999, Proceedings*. Berlin: Springer-Verlag.

- Holland, J. (1998). *Emergence. From Chaos to Order*. Reading, MA: Addison-Wesley.
- Holland, J. (1995). *Hidden Order: How Adaptation Builds Complexity*. Reading, MA: Perseus Books.
- Holland, J. (1992). *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence*. The MIT Press.
- Heudin, J.-C. (2006). Artificial Life and the Sciences of Complexity: History and Future. In: B. Feltz, M. Crommelinck & P. Goujon (Eds.), *Self-Organization and Emergence in Life Sciences* (pp. 227-47). Holanda: Springer Verlag.
- Heudin, J.-C. (Ed.). (1999). *Virtual Worlds: Synthetic universes, Digital Life, and Complexity*. Reading, MA: Perseus Books.
- Husbands, P., & Harvey, I. (Eds.). (1997). *Fourth European Conference on Artificial Life*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Johnston, J. (2008). *The Allure of Machinic Life: Cybernetics, Artificial Life, and the New AI*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Keeley, B. (1998). Artificial Life for Philosophers. *Philosophical Psychology*, 11 (2), 251-60.
- Kelemen, J., & Sosík, P. (Eds.). (2001). *Advances in Artificial Life: 6th European Conference, ECAL 2001 Prague, Czech Republic, September, 2001 Proceedings*. Berlin: Springer-Verlag.
- Kim, K.-J., & Cho, S.-B. (2006). A Comprehensive Overview of the Applications of Artificial Life. *Artificial Life*, 12 (1), 153-82.
- Korb, K., Randall, M., & Hendtlass, T. (Eds.). (2009). *Artificial Life: Borrowing from Biology. 4th Australian Conference, ACAL 2009, Melbourne, Australia, December 1-4, 2009, Proceedings*. Berlin: Springer-Verlag.
- Lahoz-Beltrà, R. (2004). *Bioinformática: simulación, vida artificial e inteligencia artificial*. Madrid: Díaz de Santos.
- Langton, C. (1996). Artificial Life. In: M. Boden (Ed.), *The Philosophy of Artificial Life* (pp. 39-94). Oxford: Oxford University Press.
- Langton, C. (1991). Life at the Edge of Chaos. In C. Langton, C. Taylor, D. Farmer, & S. Rasmussen (Eds.), *Artificial Life II, SFI Studies in the Science of Complexity* (Vol. X, pp. 41-91). Rewood City: Addison-Wesley.

- Langton, C. (1989). Artificial Life. In: C. Langton (Ed.), *Artificial Life, SFI Studies in the Science of Complexity* (Vol. VI, pp. 1-47). Redwood City: Addison-Wesley.
- Langton, C. (1986). Studying Artificial Life with Cellular Automata. *Physica 22D*, 120-49.
- Langton, C. (1984). Self-Reproduction in Cellular Automata. *Physica 10D*, 135-44.
- Langton, C. (Ed.). (1995). *Artificial Life: An Overview*. Cambridge: MIT Press.
- Langton, C. (Ed.). (1994). *Artificial Life III, SFI Studies in the Science of Complexity* (Vol. XVII). Reading, MA: Addison-Wesley.
- Langton, C. (Ed.). (1989). *Artificial Life, SFI Studies in the Science of Complexity* (Vol VI). Redwood City, USA: Addison-Wesley.
- Langton, C., & Shimohara, K. (Eds.) (1997). *Artificial Life V: Proceedings of the Fifth International Workshop on the Synthesis and Simulation of Living Systems*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Langton, C., Taylor, C., Farmer, D., & Rasmussen, S. (Eds.) (1991). *Artificial Life II, SFI Studies in the Science of Complexity* (Vol. X). Redwood City: Addison-Wesley.
- Lecky-Thompson, G. (2008). *AI and Artificial Life in Video Games*. Boston, MA: Course Technology.
- Levy, S. (1992). *Artificial Life: A Report from the Frontier Where Computers Meet Biology*. New York: Vintage Books.
- Li, K., Li, X., Irwin, G. W., & He, G. (Eds.). (2009). *Life System Modeling and Simulation International Conference, LSMS 2007, Shanghai, China, September 14-17, 2007. Proceedings*. Berlin: Springer-Verlag.
- McDermott, J., Samudrala, R., Bumgarner, R., Montgomery, K., & Ireton, R. (Eds.) (2009). *Computational Systems Biology*. New York: Humana Press.
- Meinhardt, H. (2009). *The Algorithmic Beauty of Sea Shells* (4th ed). Berlin: Springer-Verlag.
- Morán, F., Moreno, A., Merelo, J. J., & Chacón, P. (Eds.). (1995). *Advances in Artificial Life, Third European Conference on Artificial Life, Granada, Spain, June, 1995, Proceedings*. Berlin: Springer-Verlag.
- Moreno, A. (2000). Artificial Life as a Bridge Between Science and Philosophy. In: M. Bedau, J. McCaskill, N. Packard, & S. Rasmussen (Eds.), *Artificial Life VII: Proceedings of the Seventh International Conference on Artificial Life* (pp. 507-12). Cambridge, MA: MIT Press.

- Noble, J., Bullock, S., & Di Paolo, E. (2000). Artificial Life: Discipline or Method? Report on a Debate Held at ECAL '99. *Artificial Life*, 145-8.
- Packard, N., & Bedau, M. (2003). Artificial Life. In *Encyclopedia of Cognitive Science* (Vol. 1, pp. 209-15). Macmillan.
- Prusinkiewicz, P., & Lindenmayer, A. (1990). *The Algorithmic Beauty of Plants*. New York: Springer Verlag.
- Randall, M., Abbass, H., & Wiles, J. (Eds.) (2007). *Progress in Artificial Life: Third Australian Conference, ACAL 2007, Proceedings*. Berlin: Springer-Verlag.
- Ray, T. (1994). Jugué a ser Dios y creé la vida en mi computadora. En :C. Gutiérrez (Ed.), *Epistemología e informática* (pp. 257-67). San José: UNED.
- Ray, T. (1991). An Approach to the Synthesis of Life. In: C. Langton, C. Taylor, D. Farmer & S. Rasmussen (Eds.), *Artificial Life II, SFI Studies in the Science of Complexity* (Vol. X, pp. 371-408). Redwood City: Addison-Wesley.
- Recknagel, F. (Ed.). (2006). *Ecological Informatics: Scope, Techniques and Applications* (2nd ed.). Berlin: Springer-Verlag.
- Resnick, M. (1994). *Turtles, Termites and Traffic Jams*. Cambridge: MIT Press.
- Riskin, J. (Ed.) (2007). *Genesis Redux: Essays in the History and Philosophy of Artificial Life*. Chicago: University of Chicago Press.
- Rocha, L., Yaeger, L., Bedau, M., Floreano, D., Goldstone, R., & Vespignani, A. (Eds.) (2006). *Artificial Life X: Proceedings of the Tenth International Conference on the Simulation and Synthesis of Living Systems*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Schaub, H., Detje, F., & Brüggemann, U. (Eds.) (2004). *The Logic of Artificial Life: Abstracting and Synthesizing the Principles of Living Systems. Proceedings of the Sixth German Workshop on Artificial Life*. Berlin: IOS Press.
- Sipper, M. (2006). Artificial Life: from Life-as-We-Know-It to Life-as-It-Could-Be. In: J. Seckbach (Ed.), *Life as We Know It* (pp. 707-18). Dordrecht: Springer Verlag.
- Sipper, M. (1995). An Introduction to Artificial Life. *Explorations in Artificial Life (special issue of IA Expert)*, 4-8.
- Standish, R., Bedau, M., & Abbass, H. (Eds.) (2003). *Artificial Life VIII: Proceedings of the Eighth International Conference on Artificial Life*. Cambridge, MA: MIT Press.

- Taylor, C. (1991). Fleshing Out Artificial Life II. In: C. Langton, C. Taylor, D. Farmer & S. Rasmussen (Eds.), *Artificial Life II, SFI Studies in the Science of Complexity* (Vol. X, pp. 25-38). Redwood City: Addison-Wesley.
- Turing, A. (1952). The Chemical Basis of Morphogenesis. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 237 (641), 37-72.
- Varela, F., & Bourgine, P. (Eds.). (1992). *Towards A Practice of Autonomous Systems*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Von Neumann, J. (1966). *Theory of Self-Reproducing Automata*. (A. Burks, Ed.) Urbana Ill.: University of Illinois Press.
- Von Neumann, J. (1961-1963). *Collected Works, John Von Neumann, Vol. 5: Design of Computers, Theory of Automata and Numerical Analysis*. (A. H. Taub, Ed.) New York: Pergamon Press.
- Watson, J., Abbass, H., Lokan, C., & Lindsay, P. (2005). Software Engineering for Artificial Life, Complex Systems, and Agent-Based Distillation. *Complexity*, 12, 1-13.

Sección 3 Ingeniería de sistemas complejos

La historia de la ingeniería se divide en dos: la ingeniería clásica o ingeniería convencional –la cual incluye a la ingeniería de sistemas reversos– y la ingeniería de sistemas complejos. Aquélla tiene un paradigma fisicalista, digamos. Esta otra se inspira en la biología y la ecología. El primero de los libros sobre ingeniería de sistemas complejos aparece recién en el 2006. Desde entonces, no obstante, su desarrollo ha sido impresionante. Sin embargo, en el mundo, facultades de Ingeniería y de Administración permanecen aún al margen del estudio y trabajo en ingeniería de sistemas complejos.

- Awrejcewicz, J. (Ed.) (2009). *Modeling, Simulation and Control of Nonlinear Engineering: State-of-the-Art, Perspectives and Applications*. Berlin: Springer-Verlag.
- Banzhaf, W., & Pillay, N. (2007). Why Complex Systems Engineering Needs Biological Development. *Complexity*, 13 (2), 12-21.
- Braha, D., Minai, A., & Bar-Yam, Y. (Eds.) (2006). *Complex Engineered Systems: Science Meets Technology*. Cambridge, MA: Springer-Verlag.
- Cook, S., Kasser, J., & Ferris, T. (2003). *Elements of a Framework for the Engineering of Complex Systems. 9th ANZSYS Conference*. Melbourne.
- Ioannou, P., & Pitsillides, A. (Eds.) (2008). *Modeling and Control of Complex Systems*. Boca Raton: CRC Press.
- Jamshidi, M. (Ed.) (2009). *Systems of Systems Engineering. Principles and Applications*. Boca Raton: CRC Press.
- Maldonado, C.E. (2010). Ingeniería de sistemas complejos. Retos y oportunidades. En: L. Pineda y P. Padilla (Eds.), *El futuro de la educación en Ingeniería y la gestión de la Ingeniería. Una perspectiva sistémica*. Metz (Francia): Ed. Universidad del Rosario, Instituto Tecnológico de Metz.
- Norman, D., & Kuras, M. (2006). Engineering Complex Systems. In: D. Braha, A. Minai & Y. Bar-Yam (Eds.), *Complex Engineered Systems: Science Meets Technology* (pp. 206-45). Berlin: Springer-Verlag.

- Oliver, D., Kelliher, T., & Keegan, J. (1997). *Engineering Complex Systems With Models and Objects*. New York: McGraw-Hill.
- Ronald, E., & Sipper, M. (2000). Engineering, Emergent Engineering, and Artificial Life: Unsurprise, Unsurprising Surprise, and Surprising Surprise. In: M. Bedau, M. John, N. Packard & S. Rasmussen (Eds.), *Artificial Life VII: Proceedings of the Seventh International Conference on Artificial Life* (pp. 523-8). Cambridge, MA: MIT.
- Villamil, J., & Gómez Cruz, N. (2009). Ingeniería de sistemas complejos. En: C.E. Maldonado, *Complejidad: revolución científica y teoría* (pp. 71-82). Bogotá: Ed. Universidad del Rosario.
- Wolfram, S. (1986). Approaches to Complexity Engineering. *Physica D*, 22, 385-99.

3.1. Metaheurísticas (híbridas, paralelas, hiperheurísticas), optimización y resolución de problemas

Digámoslo de manera franca: la ciencia contemporánea no es una posesión o una adquisición—en marcado contraste con la ciencia moderna, que responde en realidad al mismo espíritu de la Edad Media—. Por el contrario, hoy por hoy se es científico—en el sentido al mismo tiempo más amplio e incluyente que abarca, por ejemplo, al arte tanto como a la ingeniería, a la ciencia tanto como a la filosofía—, en función de los problemas que se tengan o que se propongan. De esta manera, se produce un giro de los problemas clásicos de optimización y la misma comprensión acerca de las preguntas, los problemas y las soluciones a los problemas, para volver la mirada hacia las metaheurísticas y los espacios (o conjuntos) de solución de los problemas.

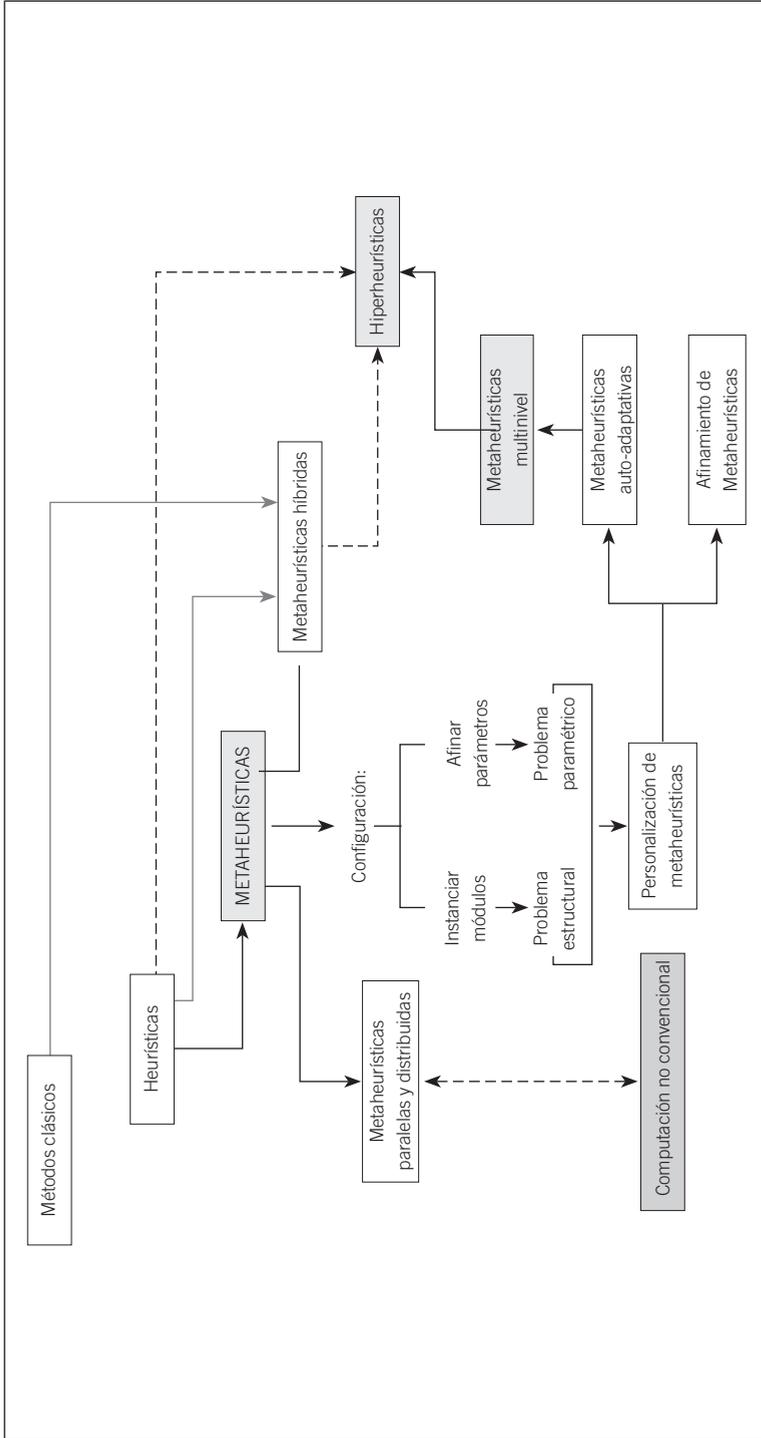
Dicho en el lenguaje clásico: tradicionalmente se pensó que la filosofía consistía en formular preguntas o en concebir problemas; pero las respuestas—cuando las había— no eran tanto filosóficas, cuanto que científicas. La tarea de la ciencia fue siempre la de resolver enigmas, despejar dudas, revelar incógnitas. Pues bien, en el marco del espíritu y del trabajo en ciencias de la complejidad, la filosofía ha aprendido a apostarle a las respuestas, tanto como que la ciencia misma ha aprendido a formular preguntas y a concebir problemas.

Es una especificidad del trabajo en complejidad no pensar en una solución única, mejor, óptima, maximizadora, o ni siquiera de *second best*. Las ciencias de la complejidad piensan en conjuntos de problemas y, consiguientemente, en conjuntos de soluciones. A eso apunta el lenguaje empleado tal como: redes, cascadas, percolación, sensibilidad a las condiciones iniciales, y otros. Lo fantástico está en el hecho de que las metaheurísticas jalonan todo el trabajo de respuesta y solución a los retos y problemas. Aquí el computador constituye una herramienta imprescindible.

Las metaheurísticas son el marco algorítmico más reciente para el trabajo con, y la resolución de, problemas complejos en ingeniería, negocios y ciencia. Las metaheurísticas reconocen la imposibilidad de una solución óptima y buscan hallar, por el contrario, soluciones “razonables” con recursos “aceptables”. Antes de ellas predominaron las técnicas convencionales de la investigación de operaciones y los modelos heurísticos de la inteligencia artificial. Pero justamente, el trabajo con metaheurísticas se hace necesario e incluso ineludible cuando las técnicas y modelos convencionales reconocen su incapacidad de abordar problemas de complejidad creciente.

Tres grandes retos (o problemas abiertos) motivan las investigaciones más recientes en el campo de las metaheurísticas (esquema 7). El primero tiene que ver con la posibilidad, e incluso con la necesidad, de construir sistemas híbridos no sólo empleando metaheurísticas, sino también modelos clásicos y heurísticas convencionales. El plano más desarrollado en esta dirección es el de las *metaheurísticas*, que son técnicas que logran emplear (meta) heurísticas en un nivel superior para la elección de (meta) heurísticas de bajo nivel que resuelvan los puntos de decisión de un problema complejo. El segundo reto se refiere al diseño de metaheurísticas paralelas y distribuidas, esto con el fin de explotar las cada vez mayores prestaciones que estas arquitecturas suponen. En este caso, la computación no convencional juega un papel central. El tercer problema consiste en saber elegir cuándo y cuál metaheurística elegir en un momento dado, así como con el afinamiento de sus parámetros.

Esquema 7
Estado del arte del trabajo con metaheurísticas



Fuente: realizado por los autores

- Bianchi, L., Dorigo, M., Gambardella, L. M., & Gutjahr, W. (2008). A Survey on Metaheuristics for Stochastic Combinatorial Optimization. *Natural Computing* (8), 239-87.
- Birattari, M. (2009). *Tuning Metaheuristics. A Machine Learning Perspective*. Berlin: Springer-Verlag.
- Blum, C., Blesa, M. J., Blesa, A., & Sampels, M. (Eds.) (2008). *Hybrid Metaheuristics: An Emerging Approach to Optimization*. Berlin: Springer-Verlag.
- Coello, C., Dhaenens, C., & Jourdan, L. (Eds.) (2010). *Advances in Multi-Objective Nature Inspired Computing*. Berlin: Springer-Verlag.
- Cotta, C., Sevaux, M., Sörensen, K. (Eds.) (2008). *Adaptive and Multilevel Metaheuristics*. Berlin: Springer Verlag.
- Doerner, K. et al. (Eds.) (2007). *Metaheuristics: Progress in Complex Systems Optimization*. Berlin: Springer-Verlag.
- Donoso, Y., & Fabregat, R. (2007). *Multi-Objective Optimization in Computer Networks Using Metaheuristics*. Boca Raton: Auerbach Publications.
- Dreo, J., Pétrowski, A., Siarry, P., & Taillard, E. (2006). *Metaheuristics For Hard Optimization: Methods and Case Studies*. Berlin: Springer-Verlag.
- Maniezzo, V., Stützle, T., & VoB, S. (Eds.) (2009). *Matheuristics: Hybridizing Metaheuristics and Mathematical Programming*. Berlin: Springer-Verlag.
- Marti, K. (2008). *Stochastic Optimization Methods* (2nd ed). Berlin: Springer-Verlag.
- Talbi, E.-G. (2009). *Metaheuristics: From Design to Implementation*. New Jersey: John Wiley & Sons.

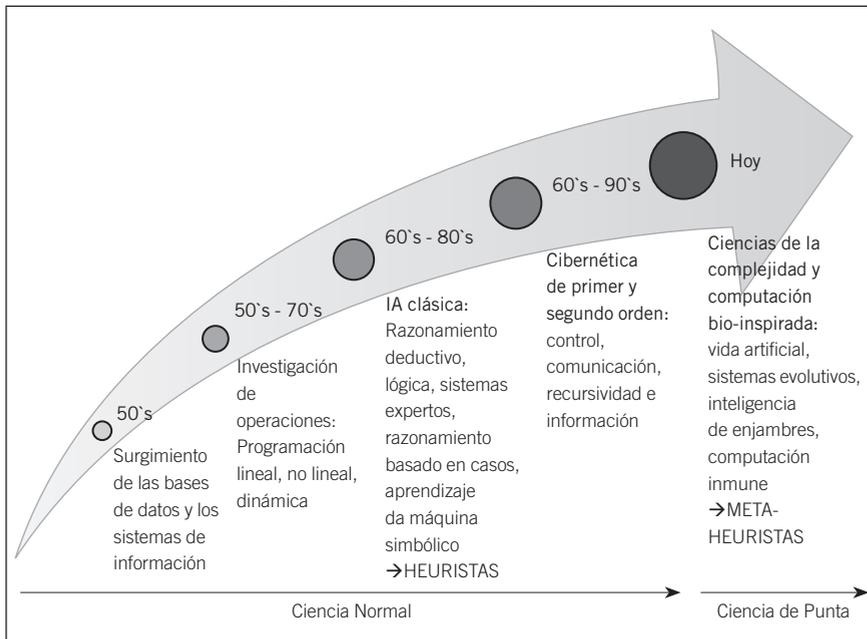
3.2. Inteligencia computacional, inteligencia artificial bio-inspirada, computación suave, computación natural y computación bio-inspirada

Computar es un rasgo común, transversal, si se prefiere, a los seres humanos, a los sistemas expertos y artificiales, a la naturaleza misma. Cada época posee su propia metáfora (“El Gran Arquitecto”, “La Máquina Perfecta”, y muchos otros). Una de las últimas metáforas acuñadas es el reconocimiento de que, finalmente, esto es, sustancialmente, lo que hace el universo es computar.

El esquema 8 muestra la evolución de las técnicas de resolución de problemas (de optimización) y con ella de los sistemas computacionales. Así, las técnicas de resolución de problemas pasaron de los modelos matemáticos a los modelos inspirados por la biología. Los sistemas computacionales, por su parte, pasaron de arquitecturas seriadas a modelos masivamente paralelos. Sirve, además, como criterio de demarcación entre el pensamiento (= ciencias) sistémico (sistémicas), la cibernética, el pensamiento complejo y las ciencias de la complejidad.

Esquema 8

Técnicas de optimización y con estrategias computacionales



Fuente: realizado por los autores

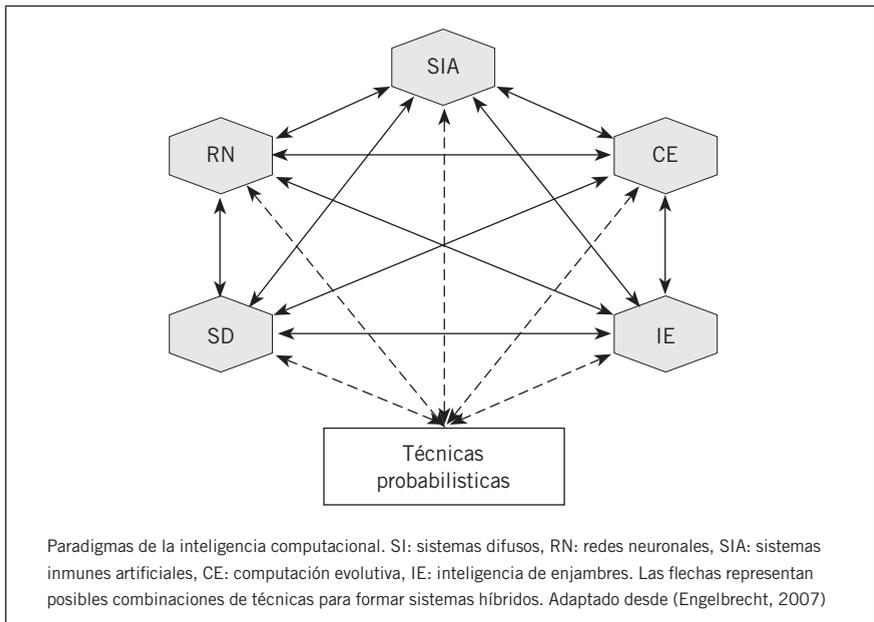
Por su parte, el esquema siguiente (esquema 9) hace referencia a los diferentes paradigmas de la *inteligencia computacional*. Son ellos (el orden no importa): los sistemas difusos, las redes neuronales, los sistemas inmunes artificiales, la computación evolutiva y la inteligencia de enjambres: todos ellos provenientes, en algún sentido, de metáforas biológicas. Se acentúa, además, el papel de las posibles relaciones entre ellas.

Los aspectos clave de este reconocimiento son dos. De un lado, la inteligencia artificial se ha desplazado, a través de la inteligencia computacional, al

plano, ciertamente más interesante y fructífero, de los sistemas bio-inspirados. De otra parte, se pone de manifiesto la posibilidad y el potencial de pensar en sistemas híbridos como lo plantea el esquema 7.

En otro plano distinto, aunque fuertemente relacionado, se encuentra el campo de la *computación natural*. Dicho campo tiene tres grandes ramas que lo componen; éstas son: i) el uso de metáforas provenientes de la naturaleza (en particular de la biología) para resolver problemas, ii) el modelamiento, la simulación y la síntesis de fenómenos naturales a través del computador, y iii) el uso de ideas y/o materiales naturales (como moléculas o células) para llevar a cabo procesos de computo inéditos. El esquema 10 permite observar la evolución –literalmente: las especiaciones– que la computación natural ha tenido. Este mismo esquema suministra una idea clara acerca de la evolución de la arquitectura de la computación –desde von Neumann– hasta los desarrollos más recientes y –verosímilmente– hacia el futuro.

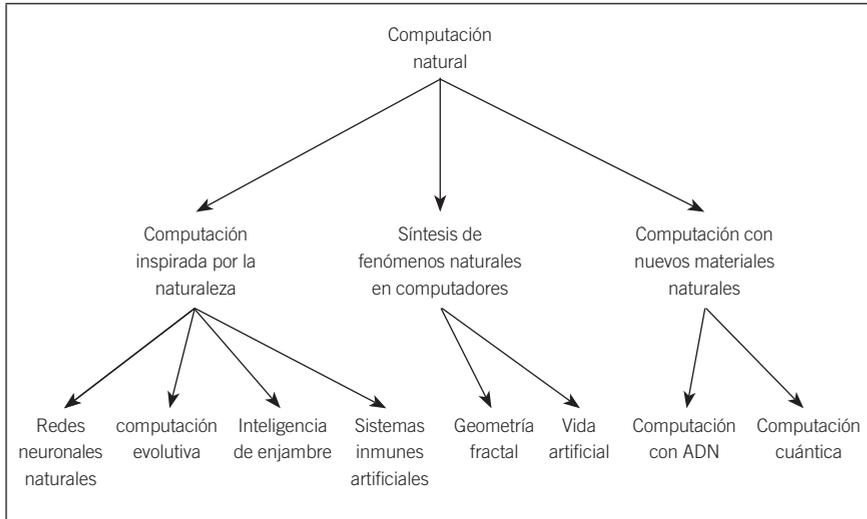
Esquema 9
Paradigmas de la inteligencia computacional



Fuente: adaptado a partir de Engelbrecht (2007)

Nota: SI: sistemas difusos, RN: redes neuronales, SIA: sistemas inmunes artificiales, CE: computación evolutiva, IE: inteligencia de enjambres. Las flechas representan posibles interacciones para formar sistemas híbridos.

Esquema 10
Ramas de la computación natural



Fuente: realizado por los autores. Basado en el texto de Castro (2007)

Con este esquema, en realidad, aquello de lo cual se trata finalmente es del esfuerzo de abordaje de los problemas decidibles hacia los problemas indecidibles, un tema que se menciona en varias ocasiones en este libro, un tema que el mismo A. Turing vislumbró y cuyo estudio se conoce hoy como *hipercomputación*.

- Abraham, A., Hassanien, A., Siarry, P., & Engelbrecht, A. (Eds.) (2009). *Foundations of Computational Intelligence* (Vol. 3: Global Optimization). Berlin: Springer-Verlag.
- Avineri, E., Köppen, M., Dahal, K., Sunitiyoso, Y., & Roy, R. (Eds.). (2009). *Advances in Soft Computing: Updating the State of the Art*. Berlin: Springer-Verlag.
- Beliczynski, B., Dzielinski, A., Iwanowski, M. & Ribeiro (Eds.) (2007). *Adaptive and Natural Computing Algorithms Part I*. Berlin: Springer-Verlag.
- Beliczynski, B., Dzielinski, A., Iwanowski, M., & Ribeiro (Eds.) (2007). *Adaptive and Natural Computing Algorithms, Part II*. Berlin: Springer-Verlag.

- Brabazon, A., & O'Neill, M. (Eds.) (2009). *Natural Computing in Computational Finance* (Vol. 2). Berlin: Springer-Verlag.
- Coppin, B. (2004). *Artificial Intelligence Illuminated*. Sudbury, MA: Jones & Bartlett.
- De Castro, L. N. (2007). Fundamentals of Natural Computing: An Overview. *Physics of Life* (4), 1-36.
- De Castro, L. N., & Von Zuben, F. (2005). *Recent Developments in Biologically Inspired Computing*. Hershey, PA: Idea Group Publishing.
- Engelbrecht, A. (2007). *Computational Intelligence: An Introduction* (2nd ed.). Chichester: John Wiley & Sons.
- Floreano, D., & Mattiussi, C. (2008). *Bio-Inspired Artificial Intelligence: Theories, Methods, and Technologies*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Fulcher, J., & Jain, L. (Eds.) (2008). *Computational Intelligence: A Compendium*. Berlin: Springer Verlag.
- Kasabov, N. (2007). *Evolving Connectionist Systems: The Knowledge Engineering Approach* (2nd ed.). Berlin: Springer-Verlag.
- Lewis A., Mostaghim, S., Randal, M. (Eds.) (2009). *Biologically-Inspired Optimisation Methods: Parallel, Systems and Applications*. Berlin: Springer.
- Lungarella, M., Iida, F., Bongard, J., & Pfeifer, R. (Eds.) (2007). *50 Years of Artificial Intelligence: Essays Dedicated to the 50th Anniversary of Artificial Intelligence*. Berlin: Springer-Verlag.
- Mumford, C., & Jain, L. (Eds.) (2009). *Computational Intelligence: Collaboration, Fusion and Emergence*. Berlin: Springer-Verlag.
- Schuster, A. (Ed.) (2007). *Intelligent Computing Everywhere*. Berlin: Springer-Verlag.
- Smolinski, T., Milanova, M., & Hassanien, A. E. (Eds.) (2008). *Applications of Computational Intelligence in Biology: Current Trends and Open Problems*. Berlin: Springer-Verlag.
- Suzuki, Y., Hagiya, M., Umeo, H., & Adamatzky, A. (Eds.) (2009). *Natural Computing: 2nd International Workshop on Natural Computing, Nagoya, Japan, December 2007. Proceedings*. Berlin: Springer-Verlag.
- Yang, A., & Shan, Y. (2008). *Intelligent Complex Adaptive Systems*. Hershey, PA: IGI Publishing.
- Zomaya, A. (Ed.) (2006). *Handbook of Nature-Inspired and Innovative Computing: Integrating Classical Models with Emerging Technologies*. Berlin: Springer-Verlag.

3.3. Computación evolutiva

La simbiosis entre teoría de la evolución –y con ella, por debajo de ella, por así decirlo, la referencia a la Nueva Biología– y la computación en general constituye, sin ninguna duda, una de las realizaciones más originales en las ciencias de la complejidad. Al respecto, sigue siendo totalmente válido el reconocimiento –muy temprano– que hizo H. Pagels acerca de la importancia de las relaciones entre complejidad y computación. Al mismo tiempo que el computador hace posible a las ciencias de la complejidad, éstas contribuyen de manera significativa al propio desarrollo de la computación.

- Bartz-Beielstein, T. (2006). *Experimental Research in Evolutionary Computation: The New Experimentalism. Natural Computing Series*. Berlin: Springer-Verlag.
- Brameier, M., & Banzhaf, W. (2007). *Linear Genetic Programming*. Berlin: Springer-Verlag.
- Davis, L. (Ed.) (1987). *Genetic Algorithms and Simulated Annealing: An Overview*. Los Altos, CA: Morgan Kaufmann Publishers.
- De Jong, K. A. (2006). *Evolutionary Computation: A Unified Approach*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Dumitrescu, D., Lazzarini, B., Jain, L., & Dumitrescu, A. (2000). *Evolutionary Computation*. Boca Raton: CRC Press.
- Goldberg, D. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Reading, MA: Addison-Wesley.
- Kramer, O. (2008). *Self-Adaptive Heuristics for Evolutionary Computation*. Berlin: Springer-Verlag.
- Lobo, F., Lima, C., & Michalewicz, Z. (Eds.) (2007). *Parameter Setting in Evolutionary Algorithms*. Berlin: Springer-Verlag
- Mitchell, M. (1995). Genetic Algorithms: An Overview. *Complexity*, 1 (1), 31-9.
- Riolo, R., Soule, T., & Worzel, B. (Eds.) (2008). *Genetic Programming: Theory and Practice V*. Berlin: Springer-Verlag.
- Rothlauf, F. (2006). *Representations for Genetic and Evolutionary Algorithms* (2nd ed). Berlin: Springer-Verlag.

- Tomassini, M. (2005). *Spatially Structured Evolutionary Algorithms: Artificial Evolution in Space and Time. Natural Computing Series*. Berlin: Springer-Verlag.
- Yang, A., Shan, Y., & Bui, L. T. (Eds.) (2008). *Success in Evolutionary Computation*. Berlin: Springer-Verlag.
- Yu, T., Davis, D., Baydar, C., & Roy, R. (Eds.) (2008). *Evolutionary Computation in Practice*. Berlin: Springer-Verlag.

3.4. Inteligencia de enjambres

El estudio de los colectivos de animales –los animales sociales, los insectos sociales (hormigas, termitas, himenópteros benéficos en general, pero también de los cardúmenes y las manadas)– ha arrojado luces maravillosas acerca de la arquitectura y la topología de la naturaleza; y por tanto, también acerca de la sociedad humana en general. El rasgo definitivo ha sido el reconocimiento del siguiente hecho: la naturaleza no piensa ni actúa como la civilización occidental lo postuló siempre: secuencial, jerárquica, lineal, cardinalmente. Por el contrario, la robustez de los sistemas naturales descansa en series en paralelo, en la ausencia de control central rígido, en la adaptación. La inteligencia de enjambre pone de manifiesto una inteligencia bastante mejor –por robusta y evolutiva– que la inteligencia humana tradicional: la de los 2.500 años de la historia de Occidente.

- Blum, C., & Merkle, D. (Eds.) (2008). *Swarm Intelligence: Introduction and Applications. Natural Computing Series*. Berlin: Springer-Verlag.
- Bonabeau, E., Dorigo, M., & Theraulaz, G. (1999). *Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems*. Oxford: Oxford University Press.
- Chan, F., & Tiwari, M. K. (Eds.) (2007). *Swarm Intelligence: Focus on Ant and Particle Swarm Optimization*. Vienna: I-Tech.
- Dorigo, M., & Blum, C. (2005). Ant colony optimization theory: A survey. *Theoretical Computer Science* (344), 243-78.
- Dorigo, M., & Stützle, T. (2004). *Ant Colony Optimisation*. Cambridge, MA: MIT Press.

- Lazinica, A. (2009). *Particle Swarm Optimization*. Vienna: In-Tech.
- Lin, C. P., Jain, L., & Dehuri, S. (Eds.) (2009). *Innovations in Swarm Intelligence*. Berlin: Springer-Verlag.
- Nedjah, N., & de Macedo Mourelle, L. (Eds.) (2006). *Swarm Intelligent Systems*. Berlin: Springer-Verlag.

3.5. Computación con membranas

Los sistemas informáticos y computacionales también han incorporado –por así decirlo– la metáfora biológica y ecológica. La ingeniería ha avanzado hasta la programación y el trabajo en términos de *hardware* análogos a los de los sistemas vivos. Un caso conspicuo, reciente, que data de 1998, es la computación con membranas.

- Ciobanu, G., Păun, G., & Pérez-Jiménez, M. (Eds.) (2006). *Applications of Membrane Computing. Natural Computing Series*. Berlin: Springer-Verlag.
- Păun, G. (2007). Tracing Some Open Problems in Membrane Computing. *Romanian Journal of Information Science and Technology*, 10 (4), 303-14.
- Păun, G. (2006). Introduction to Membrane Computing. In: G. Ciobanu, G. Păun, & M. Pérez-Jiménez (Eds.), *Applications of Membrane Computing, Natural Computing Series* (pp. 1-42). Berlin: Springer-Verlag.
- Păun, G. (2005). Membrane Computing: Power, Efficiency, Applications. In: B. Cooper, B. Löwe, & L. Torenvliet (Eds.), *New Computational Paradigms: First Conference on Computability in Europe, CiE 2005 Amsterdam, The Netherlands, June 8-12, 2005 Proceedings* (pp. 396-407). Berlin: Springer Verlag.

3.6. Computación inmune o sistemas inmunes artificiales

El estudio del sistema inmunológico humano –y en general, de los sistemas vivos– ha representado un aprendizaje estupendo, por lo pronto, para físicos

y expertos en sistemas computacionales. Esta área surge en 1998 y permite explorar caminos que la ingeniería tradicional nunca imaginó.

- Dasgupta, D. (Ed.) (1998). *Artificial Immune Systems and Their Applications*. Berlin: Springer-Verlag.
- Dasgupta, D., & Attoh-Okine, N. (1997). Immunity-Based Systems: A Survey. *Proceeding of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. 1* (pp. 369-74). IEEE.
- Dasgupta, D., & Niño, L. F. (2009). *Immunological Computation: Theory and Applications*. Boca Raton: CRC Press.
- De Castro, L. N., & Timmis, J. (2002). *Artificial Immune Systems: A New Computational Intelligence Approach*. London: Springer-Verlag.
- Flower, D., & Timmis, J. (Eds.) (2007). *In Silico Immunology*. Berlin: Springer-Verlag.
- Mo, H. (2009). *Handbook of Research on Artificial Immune Systems and Natural Computing: Applying Complex Adaptive Technologies*. Hershey: IGI Global.

3.7. Complejidad, sistemas bio-inspirados, bio-robótica y bio-hardware

Los trabajos sobre sistemas inteligentes adaptativos y sobre vida artificial ya no permanecen en el ámbito de la pantalla del computador. Los sistemas inteligentes vivos han salido del CPU y ya exploran espacios físicos comunes con el de los seres humanos.

- Higuchi, T., Liu, Y., & Yao, X. (Eds.) (2006). *Evolvable Hardware*. Berlin: Springer-Verlag.
- Iba, H. (Ed.) (2008). *Frontiers in Evolutionary Robotics*. Vienna: I-Tech.

Negoita, M., & Hintea, S. (2009). *Bio-Inspired Technologies for the Hardware of Adaptive Systems: Real-World Implementations and Applications*. Berlin: Springer-Verlag.

Wang, L., Tan, K. C., & Chew, C. M. (Eds.) (2008). *Evolutionary Robotics. From Algorithms to Implementations*. Singapore: World Scientific.

Sección 4 Complejidad y computación

El trabajo en complejidad en los mejores centros de investigación en el mundo no solamente incorpora el estudio y la investigación de los sistemas complejos con base en el modelamiento y la simulación; adicionalmente, implica de entrada un reconocimiento explícito a la importancia de la computación como forma de investigación en la ciencia contemporánea. En efecto, a título ilustrativo, para poder ser admitidos –como estudiantes de cualquier nivel o como investigadores en formación o consumados–, es una condición indispensable demostrar conocimientos de modelamiento y simulación. Desde el surgimiento de las ciencias de la complejidad, el físico H. Pagels se anticipó al señalar que existe una sólida implicación recíproca entre complejidad y computación. Al mismo tiempo que las ciencias de la complejidad son posibles gracias, entre otros factores adicionales, al surgimiento de los sistemas informacionales y computacionales, las ciencias de la complejidad contribuyen, activamente, al desarrollo de la computación. En síntesis: es imposible ser un buen científico –en el sentido al mismo tiempo más amplio, incluyente y riguroso de la palabra– sin conocer y sin trabajar sistemas, temas, problemas computacionales.

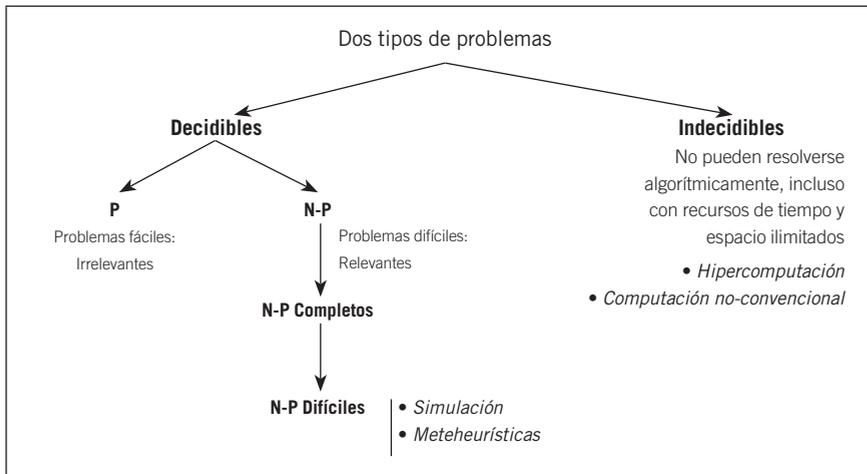
- Ceruzzi, P. (2003). *A History of Modern Computing* (2nd ed). Cambridge, MA: MIT Press.
- Copeland, J. (Ed.) (2004). *The Essential Turing: Seminal Writings in Computing, Logic, Philosophy, Artificial Intelligence, and Artificial Life: Plus The Secrets of Enigma*. Oxford: Oxford University Press.
- Copeland, J., & Proudfoot, D. (2004). Un Alan Turing desconocido. *Investigación y Ciencia, Temas 36: La Información*, 29-30.
- Ranka, S. et al. (Eds.) (2009). *Contemporary Computing. Second International Conference, IC3 2009, Noida, India, August 17-19, 2009, Proceedings*. Berlin: Springer-Verlag.

4.1. Complejidad computacional, teoría de la computación, problemas P y NP

La teoría matemática de la complejidad –que es, en rigor, el problema de las relaciones **P versus NP**, formulado al mismo tiempo pero de manera independiente por Levin, Cook y Karp– es un problema eminentemente lógico, y por tanto, computacional.

En un marco más amplio pueden identificarse dos tipos de problemas (esquema 11): aquellos que son computables y aquellos que no lo son. En el primer caso, se puede distinguir entre problemas que pueden resolverse con un algoritmo determinista en un tiempo polinomial (problemas **P**) y aquellos que pueden resolverse de forma aproximada con algoritmo no determinista en tiempo igualmente polinomial (problemas **NP**). En el segundo caso, se trata de problemas para los cuales el algoritmo que los resuelve es de tiempo exponencial, o bien se trata de problemas para los cuales no se conoce un algoritmo que logre resolverlos.

Esquema 11
Problemas decidibles e indecidibles



Fuente: realizado por los autores

- Arora, S., & Barak, B. (2009). *Computational Complexity. A Modern Approach*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Goldin, D., & Wegner, P. (2005). The Church-Turing Thesis: Breaking the Myth. In: B. Cooper, B. Löwe, & L. Torenvliet (Eds.), *New Computational Paradigms: First Conference on Computability in Europe, CiE 2005 Amsterdam, The Netherlands, June 8-12, 2005 Proceedings* (pp. 152-68). Berlin: Springer Verlag.
- Goldreich, O. (2008). *Computational Complexity. A Conceptual Approach*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Kozen, D. (2006). *Theory of Computation*. Berlin: Springer-Verlag.
- Maldonado, C. E., & Gómez Cruz, N. (2009b). Facing N-P Problems via Artificial Life: a Philosophical Appraisal. In: *Advances in Artificial Life: 10th European Conference on Artificial Life, ECAL 2009* (pp. --). Berlin: Springer-Verlag.
- Sipser, M. (2006). *Introduction to the Theory of Computation* (2nd ed.). Boston, MA: Thomson.
- Wolfram, S. (2002). *A New Kind of Science*. Champaign: Wolfram Research.
- Wolfram, S. (1994). Twenty Problems in the Theory of Cellular Automata. In: S. Wolfram, *Cellular Automata and Complexity: Collected Papers* (pp. 457-85). Addison-Wesley.
- Wolfram, S. (1984). Universality and Complexity in Cellular Automata. *Physica 10D*, 1-35.

4.2. Nuevos modelos de computación, nuevos paradigmas de programación, computación no estándar, computación no convencional e hipercomputación

La arquitectura de la computación de von Neumann ya quedó atrás. Hacia delante se miran otras arquitecturas. Ellas implican, adicionalmente, un nuevo y distinto modo de computar. Ulteriormente –ya anticipado por la teoría matemática de la complejidad–, el tema o el problema de base es la criptografía. Hoy van ganando los encriptadores. Pero ya todos sabemos que su tiempo es finito. En el momento en el que triunfen los decriptadores será justamente el triunfo de la computación no-convencional y de la hipercomputación.

- Adamatzky, A., De Lacy-Costello B., Bull, L., Stepney, S., & Teuscher, C. (Eds.) (2007). *Unconventional Computing 2007*. Frome: Luniver Press.
- Amos, M. (2005). *Theoretical and Experimental DNA Computation. Natural Computing Series*. Berlin: Springer-Verlag.
- Bernardini, F., Gheorghe, M., Krasnogor, N., & Terrazas, G. (2005). Membrane Computing: Current Results and Future Problems. In: B. Cooper, B. Löwe & L. Torenvliet (Eds.), *First Conference on Computability in Europe, CiE 2005* (pp. 49-53). Berlin: Springer-Verlag.
- Cooper, B., Löwe, B., & Sorbi, A. (Eds.) (2008). *New Computational Paradigms: Changing Conceptions of What is Computable*. Berlin: Springer-Verlag.
- Cooper, B., Löwe, B., & Torenvliet, L. (Eds.) (2005). *New Computational Paradigms: First Conference on Computability in Europe, CiE 2005 Amsterdam, The Netherlands, June 8-12, 2005 Proceedings*. Berlin: Springer-Verlag.
- Dittrich, P. (2005). Chemical Computing. In J.-P. Banâtre, P. Fradet, J.-L. Giavitto, & O. Michel (Eds.), *Unconventional Programming Paradigms* (pp. 19-32). Berlin: Springer-Verlag.
- Dittrich, P., Ziegler, J., & Banzhaf, W. (2001). Artificial Chemistries: A Review. *Artificial Life*, 7 (3), 225-75.
- Fernández, M. (2009). *Models of Computation: An Introduction to Computability Theory*. Berlin: Springer Verlag.
- Ignatova, Z., Martínez-Pérez, I., & Zimmermann, K. H. (2008). *DNA Computing Models*. Berlin: Springer-Verlag.
- Păun, G. (2007). Tracing Some Open Problems in Membrane Computing. *Romanian Journal of Information Science and Technology*, 10 (4), 303-14.
- Păun, G. (2005). Membrane Computing: Power, Efficiency, Applications. In: B. Cooper, B. Löwe & L. Torenvliet (Eds.), *New Computational Paradigms: First Conference on Computability in Europe, CiE 2005 Amsterdam, The Netherlands, June 8-12, 2005 Proceedings* (pp. 396-407). Berlin: Springer Verlag.
- Sipper, M. (1990). The Emergence of Cellular Computing. *IEEE Computer*, 18-26.

- Syropoulos, A. (2008). *Hypercomputation: Computing Beyond the Church-Turing Barrier*. Berlin: Springer-Verlag.
- Teuscher, C. (2009). Cellular Computing. In: R. Meyer (Ed.), *Encyclopedia of Complexity and Systems Science* (pp. 922-36). Berlin: Springer Verlag.
- Würtz, R. (Ed.) (2008). *Organic Computing*. Berlin: Springer Verlag.

4.3. Teoría algorítmica de la información

Gregory Chaitin ocupa un lugar propio en el contexto de las ciencias de la complejidad. Ese lugar es el de la teoría algorítmica de la información. De la profusa obra de Chaitin conocemos y hemos trabajado sobre los textos referidos a continuación.

Por su parte, Zurek tiene contribuciones fundamentales a la medición de la entropía, aun cuando recientemente se ha concentrado en temas relacionados con la física cuántica en general.

- Chaitin, G. J. (2007). *Meta Maths. The Quest for Omega*. London: Atlantic Books.
- Chaitin, G. J. (2007). *Thinking About Gödel and Turing. Essays on Complexity, 1970-2007*. World Scientific.
- Chaitin, G. J. (2002). *Conversations with a Mathematician. Math, Art, Science and The Limits of Reason*. Springer Verlag.
- Chaitin, G., J. (2001). *Exploring Randomness*. Springer Verlag.
- Chaitin, G. J. (1999). *The Unknowable*. Springer Verlag.
- Chaitin, G. J. (1998). *The Limits of Mathematics*. Springer Verlag.
- Zurek, W. J. (1990). *Complexity, Entropy and the Physics of Information*. Westview Press.

Sección 5 Complejidad y sistemas vivos

El fenómeno de máxima complejidad conocida en el universo lo constituyen, sin lugar a dudas, los sistemas vivos, la vida. No sin razón, J. Maddox señalaba que los tres problemas últimos de la investigación científica y filosófica son: el conocimiento del origen y la estructura de la materia, el conocimiento acerca del origen y la naturaleza de la vida, y el problema de las relaciones mente-cerebro. La vida es una especie de materia que no se reduce a simple materialidad; por lo menos no hasta que sepamos qué es la materia; y por tanto, las relaciones con la antimateria, la de la energía con la energía oscura del universo. Las relaciones mente-cerebro son pertinentes para un tipo de vida: supuesta la escisión, básica, entre organismos sésiles y móviles. Estamos en los umbrales del estudio de las relaciones entre vida y complejidad.

- Andrade, E. (2003). *Los demonios de Darwin*. Bogotá: Unibiblos.
- Davies, P. (2008). ¿Convivimos con microorganismos alienígenos? *Investigación y Ciencia* (febrero), 14-22.
- Goodwin, B. (1999). *Las manchas del leopardo: la evolución de la complejidad*. Barcelona: Tusquets.
- Goodwin, B., & Solé, R. (2000). *Signs of Life: How Complexity Pervades Biology*. New York: Basic Books.
- Gribbin, J. (2006). *Así de simple. El caos, la complejidad y la aparición de la vida*. Barcelona: Crítica.
- Kaneko, K. (2006). *Life: An Introduction to Complex Systems Biology*. Berlin: Springer-Verlag.
- Kauffman, S. (2000). *Investigations*. Oxford: Oxford University Press.
- Kauffman, S. (1995). *At Home in the Universe. The Search for the Laws of Self-Organization*. Oxford: Oxford University Press.
- Kauffman, S. (1993). *The Origins of Order: Self-Organization and Selection in Evolution*. Oxford: Oxford University Press.
- McDermott, J., Samudrala, R., Bumgarner, R., Montgomery, K., & Ireton, R. (Eds.) (2009). *Computational Systems Biology*. New York: Humana Press.

- Mitchell, S. D. (2003). *Biological Complexity and Integrative Pluralism*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Solé, R., & Goodwin, B. (2000). *Signs of Life: How Complexity Pervades Biology*. New York: Basic Books.
- Stewart, I. (1999). *El segundo secreto de la vida*. Barcelona: Crítica.
- Varela, F. (2000). *El fenómeno de la vida*. Santiago de Chile: Dolmen.

Sección 6

Complejidad y ciencias sociales

El concepto de ciencias sociales y humanas es, à la lettre, un concepto decimonónico. Surge gracias a A. Comte y de ahí en adelante. Dado el progreso del conocimiento, el trabajo en términos interdisciplinarios, cruzados, transversales, integrales –que es justamente lo que caracteriza a la ciencia de punta en general y a las ciencias de la complejidad en particular–, el concepto mismo de ciencias naturales o positivas y ciencias sociales y humanas resulta, al cabo, vetusto. Lo que sucede es que administrativamente, en el mundo entero aún se estructura el conocimiento en términos de las divisiones provenientes del siglo XIX y comienzos del siglo XX.

Como quiera que sea, de acuerdo con el informe de la Comisión Gulbenkian, las ciencias sociales y humanas requieren abrirse. Esta apertura de las ciencias sociales es, para un buen lector, de un lado, hacia la sociedad, y de otra parte, y de un modo muy fundamental, a las ciencias llamadas naturales y demás. Pues bien, con seguridad: se trata de abrirse a los progresos cruzados que en otros dominios científicos están teniendo lugar.

La bibliografía referida a continuación tiene que ver con el diálogo abierto, frontal con las ciencias de la complejidad. Esta historia es reciente, pero al mismo tiempo sólida y creciente. Está bien nutrida, aunque aún se encuentre en pañales, por así decirlo.³

6.1. Bibliografía general sobre complejidad y ciencias sociales y humanas

La idea general es que las ciencias sociales y humanas poseen, estudian, se ocupan de los sistemas, fenómenos y comportamientos de máxima complejidad conocida hasta la fecha. Los fenómenos que ocupan los sistemas físicos, por ejemplo, son bastante más predecibles. Una parte de la comunidad científica de científicos sociales, cuando escuchan los temas de complejidad sostienen: “Pero si es justamente lo que hacemos nosotros, y es lo que siem-

³ En campos como la geografía y el trabajo social no existe (o no se ha logrado identificar) literatura al respecto.

pre hemos dicho”, o: “se trata de vino viejo en tonel nuevo”, por ejemplo. Mientras que existe algún escepticismo en una parte de la comunidad de este grupo de científicos, incluidos los filósofos, existe una parte grande y sólida que trabaja en términos de conceptos, metodologías, lenguajes y enfoques propios de las ciencias de la complejidad. Digámoslo de manera puntual: en el contexto de las ciencias de la complejidad, las antiguas divisiones entre ciencia y tecnología (ingeniería, por ejemplo), entre ciencias duras y ciencias blandas, entre ciencia y filosofía se hacen, ya, insostenibles. El encuentro de ciencias y disciplinas modifica el propio estatuto epistemológico y social que poseían antes del encuentro, el diálogo y el trabajo mancomunado.

El encuentro de ciencias y disciplinas se establece en función de la identificación de y el trabajo sobre *problemas*. Son los problemas los que unen a los científicos entre sí, y a ellos con la sociedad en general. Su comprensión, su esfuerzo de resolución, los horizontes que contienen, las dimensiones que anticipan hacia delante y hacia atrás.

Prigogine, I., & Stengers, I. (1994). *La nueva alianza. Metamorfosis de la ciencia*. Madrid: Alianza.

Taylor, M. C. (2003). *The Moment of Complexity. Emerging Network Culture*. The University of Chicago Press.

Tyrntania, L. (1999). *Termodinámica de la supervivencia para las ciencias sociales*. Iztapala, México, D.F.: Universidad Autónoma Metropolitana.

Wallerstein, I. (2004). *The Uncertainties of Knowledge*. Temple University (Hay traducción al español, en Editorial Gedisa).

6.2. Complejidad y sociología

La sociología siempre se ocupó de sujetos colectivos, en el mejor espíritu de la complejidad. Pero los redujo a diversos planos y conceptos. En este sentido, el primer libro sobre sociología y complejidad aparece en el año 2006. Aunque, desde otra perspectiva, el libro de D. Watts –sociólogo de formación– es un ejemplo magnífico en el que la sociología se cruza con y se integra a la física, la criticalidad autoorganizada, las redes complejas, la irreversibilidad de la

flecha del tiempo, etc. Aquí, la sociología deja de ser tal para metamorfosearse (I. Prigogine) en complejidad.

- Smith, J., & Jenks, C. (2006). *Qualitative Complexity*. London: Routledge.
- Sawyer, R. K. (2004). The Mechanisms of Emergence. *Philosophy of the Social Sciences*, 34 (2), 260-82.
- Stewart, P. (2001). Complexity Theories, Social Theory, and the Question of Social Complexity. *Philosophy of the Social Sciences*, 31(3), 323-60.
- Watts, D. J. (2003). *Six Degrees. The Science of a Connected Age*. New York: W. W. Norton & Co.

6.3. Complejidad y antropología

El primer libro de antropología y complejidad se concentra, sintomáticamente, en la vida artificial y en la cultura digital, de la cual las ciencias de la complejidad son la mayor expresión. Sin embargo, el libro de mayor profundidad en antropología, y por consiguiente en arqueología (la arqueología es antropología en pasado), es el trabajo, hasta ahora insuperable de Beekman y Baden.

- Adams, R. N. (2001). *El octavo día. La evolución social como autoorganización de la energía*. Iztapala, México, D.F.: Universidad Autónoma Metropolitana.
- Beekman, C. S., & Baden, W. W. (2005). *Non Linear Models for Archeology and Anthropology: Continuing the Revolution*. Ashgate Publishing.
- Helmreich, S. (1998). *Silicion Second Nature. Culturing Artificial Life in a Digital World*. University of California Press.

6.4. Complejidad y filosofía

La corriente principal (*mainstream*) de la filosofía se ha dividido en dos: una que hace, al mejor ejemplo de autores como Aristóteles, Hegel o Husserl, de sí misma un motivo de trabajo, o en el mejor de los casos, un pretexto para desarrollarse como *philosophia primera*. La otra, es aquella que renuncia a la metafísica y se transforma en ética, ética aplicada, sociología, teoría del derecho o filosofía política, entre otras. Los autores contemporáneos son numerosos en cualquiera de estas dos posturas principales de la filosofía contemporánea. Entre los filósofos contemporáneos que trabajan complejidad resaltan los dos nombres mencionados abajo. Un elemento común a ambos es que se trata, en rigor, de filósofos de la ciencia. Un nombre tangencial a las ciencias de la complejidad, pero muy consciente del significado de temas como la vida artificial es D. Dennett, que se omite aquí debido a que no tiene ningún texto mayor directamente relacionado con complejidad.

Bunge, M. (2003). *Emergence and Convergence: Qualitative Novelty and the Unity of Knowledge*. Toronto: University of Toronto Press.

Rescher, N. (1998). *Complexity. A Philosophical Overview*. New Brunswick (USA) & London (UK): Transaction Publishers.

6.5. Complejidad e historia

Consagrado como uno de los mejores historiadores contemporáneos, y entre los mejores en esta disciplina en toda la historia, W. H. McNeill tiene el mérito de abrir las puertas en doble vía. Sin embargo, sería injusto omitir aquí los trabajos de F. Fernández-Armesto, a pesar de que no emplea para nada el concepto de “complejidad” en su obra; sus trabajos son estupendos ejemplos de lo que es el trabajo historiográfico en el marco de las ciencias de la complejidad. De alguna manera, también hay que mencionar aquí el trabajo historiográfico del teórico de la cultura J. Barzun.

- Gaddis, J. L. (2002). *The Landscape of History. How historians map the past*. New York: Oxford University Press.
- Lindenfeld, D. F. (1999). Causality, Chaos Theory, and the End of the Weimar Republic: A Commentary on Henry Turner's *Hitler's Thirty Days to Power*. *History and Theory*, 38 (October), 281-99.
- McCloskey, D. N. (1991). History, Differential Equations, and the Problem of Narration. *History and Theory*, 30 (February), 21-36.
- McNeill, W. H. (2001). Passing Strange: The Convergence of Evolutionary Science with Scientific History. *History and Theory*, 40 (February), 1-15.
- McNeill, W. H. (1998). History and the Scientific Worldview. *History and Theory*, 37 (February), 1-13.
- Reddy, W. M. (2001). The Logic of Action: Indeterminacy, Emotion, and Historical Narrative. *History and Theory*, 40 (December), 10-33.
- Shermer, M. (1995). Exorcising Laplace's Demon: Chaos and Antichaos, History and Metahistory, *History and Theory*, 34 (February), 59-83.
- Wallerstein, I. (1987). Historical systems as complex systems. *European Journal of Operational Research*, 30, 203-7.

6.6. Complejidad y psicología

En psicología predominan, en el mejor de los casos, ya con personalidad propia, los enfoques sistémicos. Hay que decir que, en sentido estricto, la obra de H. Maturana no forma parte, en manera alguna, de las ciencias de la complejidad, sino de aquello que, en referencia a la *Enciclopedia de complejidad y ciencias de sistemas* –reseñada antes arriba– se integra en las ciencias de sistemas, que son históricamente anteriores a la emergencia de la complejidad. El segundo libro referido a continuación contiene el nacimiento (y el debate) del concepto de autopoiesis, obra de F. Varela y H. Maturana.

- Maturana, H., Varela, F. (1990). *El árbol del conocimiento. Las bases biológicas del conocimiento humano*. Madrid: Debate.
- Maturana, H., Varela, F. (1994). *De máquinas y seres vivos. Autopoiesis: La autoorganización de lo vivo*. Buenos Aires: Lumen.

6.7. Complejidad y estudios culturales

Los estudios culturales están dominados, hoy por hoy, por los llamados estudios postcoloniales. Los dos libros mencionados se zambullen, si cabe la expresión, en el mar de las ciencias de la complejidad, con placer y con habilidad de buenos nadadores.

Taylor, M. C. (2001). *The Moment of Complexity. Emerging Network Culture*. Chicago: The University of Chicago Press.

Wheeler, W. (2006). *The Whole Creature. Complexity, Biosemiotics and the Evolution of Culture*. London: Lawrence & Whishart.

Sección 7 Organizaciones y complejidad

7.1. Complejidad, organizaciones, administración, negocios, toma de decisiones

Aunque la literatura sobre complejidad y administración es muy grande, son pocos los textos que valen la pena. La mayoría de la literatura es simple y llana jerga. Los textos que se mencionan a continuación dan una idea clara de que es posible pensar y actuar en contextos de finanzas, gobierno, administración, economía, o teoría de juegos.

Los administradores, financistas e ingenieros son eminentemente pragmáticos y principalmente piensan en herramientas y aplicaciones. Una lectura juiciosa de la siguiente bibliografía sorprendería a más de un administrador o ingeniero.

- Axelrod, R., & Cohen, M. D. (1999). *Harnessing Complexity. Organizational Implications of a Scientific Frontier*. New York: The Free Press.
- Clippinger, J. (1999). *The Biology of Business: Decoding the Natural Laws of Enterprise*. John Wiley & Sons.
- Cook, M., Noyes, J., & Masakowsky, Y. (Eds.) (2007). *Decision Making in Complex Environments*. Burlington: Ashgate.
- Gilpin, D. R., Murphy, P. J. (2008). *Crisis Management in a Complex World*. Oxford: Oxford University Press.
- Grint, K. (2006). *Fuzzy Management. Contemporary Ideas and Practices at Work*. Oxford: Oxford University Press.
- Helbing, D. (Ed.) (2008). *Managing Complexity: Insights, Concepts, Applications*. Berlin: Springer-Verlag.
- Kraus, S. (2001). *Strategic Negotiation in Multiagent Environments*. Cambridge, MA: MIT Press.
- McMillan, E. (2008). *Complexity, Management and the Dynamics of Change: Challenges for Practice*. Londres: Routledge.

- McMillan, E. (2004). *Complexity, Organizations and Change*. Londres: Routledge.
- Michalewicz, Z., Schmidt, M., Michalewicz, M., & Chiriack, C. (2007). *Adaptive Business Intelligence*. Berlin: Springer-Verlag.
- North, M., & Macal, C. (2007). *Managing Business Complexity: Discovering Strategic Solutions with Agent-Based Modeling and Simulation*. Oxford: Oxford University Press.
- Pascale, R., Millemann, M., & Gioja, L. (2000). *Surfing the Edge of Chaos: The Laws of Nature and the New Laws of Business*. Three Rivers Press.
- Schredelseker, K., & Hauser, F. (2008). *Complexity and Artificial Markets*. Berlin: Springer-Verlag.
- Stacey, R., Griffin, D., & Shaw, P. (2000). *Complexity and Management: Fad or Radical Challenge to Systems Thinking?* Londres: Routledge.
- Qudrat-Ullah, H., Spector, J., & Davidsen, P. (Eds.) (2008). *Complex Decision Making: Theory and Practice*. Berlin: Springer-Verlag.

7.2. Complejidad, economía y finanzas

La economía tradicional permanece en el marco de cuatro ejes: micro, macro, finanzas y comercio. Las demás son áreas episódicas, como la historia de las doctrinas económicas. Las finanzas, por su parte, pueden encontrar en el diálogo con los fractales luces novedosas.

- Anderson, P. W., Arrow, K. J., Pines, D. (Eds.) (1988). *The Economy as an Evolving Complex System. Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity* (Vol. V). Westview Press.
- Arthur, W. B. (1994). *Increasing Returns and Path Dependence in the Economy*. Ann Arbor: University of Michigan Press.
- Arthur, W. B., Durlauf, S. N., & Lane, D. A. (Eds.) (1997). *The Economy as an Evolving Complex System II. Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity* (Vol. XXVII). Westview Press.

- Blume, L. E., Durlauf, S. N. (2006). *The Economy as an Evolving Complex System III. Current Perspectives and Future Directions*. Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity. Oxford: Oxford University Press.
- Brabazon, A., & O'Neill, M. (Eds.) (2009). *Natural Computing in Computational Finance* (Vol. 2). Berlin: Springer-Verlag.
- Ehrentreich, N. (2008). *Agent-Based Modeling: The Santa Fe Institute Artificial Stock Market Model Revisited*. Berlin: Springer-Verlag.
- Mandelbrot, B., & Hudson, R. (2006). *Fractales y finanzas: una aproximación matemática a los mercados: arriesgar, perder y ganar*. Metatemas 93. Barcelona: Tusquets.
- Rothschild, M. (1992). *Bionomics: Economy as an Ecosystem*. New York: Henry Holt & Co.
- Ormerod, P. (2005). *Why Most Things Fail. Evolution, Extinction & Economics*. New York: Pantheon Books.

7.3. Consultoría empresarial en el marco de las ciencias de la complejidad

Es sabido que en Estados Unidos hay un dicho muy popular: si una idea es buena, produce dinero. Pues bien, la complejidad –más exactamente las ciencias de la complejidad– son una muy, muy buena idea, pues las experiencias de negocios que incorporan a las ciencias de la complejidad incluyen a las más destacadas y fuertes empresas en el mundo.

Siempre cabe recordar –no solamente en el plano teórico, político o militar, por ejemplo– aquella idea de H. Pagels según la cual quien domine las ciencias de la complejidad tendrá, por decir lo menos, una clara ventaja competitiva en el mercado, una posición de ventaja en los procesos de negociación en general, en fin, una estructura mental que le aportará réditos magníficos. Las referencias a continuación ilustran estas ideas. Aquí la idea es que quienes estén interesados naveguen, en profundidad, en los *links* mencionados.

- SolveIT Software*. Fue fundada en ¿2005? en Adelaine, Australia por Zbigniew Michalewicz, Constantine Chiriac y Matthew Michalewicz, con el apoyo de la Universidad de Adelaine, Australia y el Instituto Polish-Japanese IT.
- ProtoLife, Inc.* Se creó en 2004. Sus fundadores fueron Mark Bedau y Norman Packard (ver: <http://www.protolife.net>).
- AntOptima*. Se creó en 2001 en Lugano, Suiza. Su presidente es Enzo Lucibello. Dentro de sus más notables investigadores se encuentran Marco Dorigo y Luca Maria Gambardella (ver: <http://www.antoptima.com/>).
- Icosystem*. La fundó Eric Bonabeau en el año 2000 en Cambridge, MA, Estados Unidos (ver: <http://icosystem.com>).
- NuTech Solutions*. Fue fundada en 1999 por Dan Cullen, Matthew Michalewicz y Zibigniew Michalewicz. Tiene sedes en Estados Unidos, Alemania y Polonia (ver: <http://nutechsolutions.com>).
- Eurobios*. Se creó en 1999 en París, Francia. Su actual presidente es Hervé Zwirn (ver: <http://eurobios.com>).
- Swarm Corp.* Creada en 1997 en Nuevo México, Estados Unidos. Sus fundadores fueron Christopher Langton, Glen Ropella y Douglas Orr (ver: <http://tempusdictum.com/misc/swarmcorp-www/>).
- Bios Group*. Creada en 1996 en Nuevo México, Estados Unidos. Fue fundada por Stuart Kauffman y la compañía Ernst & Young. Hacia 2003, Bios Group fue comprada por NuTech Solutions.
- Natural Selection, Inc.* Creada en 1993 en San Diego, Estados Unidos. Fundada por Lawrence, David y Eva Fogel (ver: <http://www.natural-selection.com>).
- Prediction Company*. Creada en 1991 en Nuevo México, Estados Unidos. Fundada por Doyne Farmer, Normar Packard y Jim McGill (ver: <http://www.prediction.com>).

Sección 8 Complejidad y...

8.1. Complejidad y educación

El panorama de la educación está dominado por el libro famoso de E. Morin sobre los siete saberes. Y la comunidad de educadores, pedagogos y filósofos de la educación no conoce más referentes. Los libros mencionados abajo se sitúan en la atmósfera de las ciencias de la educación. Hay que decir que, hasta la fecha, el más importante trabajo en el mundo sobre complejidad y educación se lleva a cabo en la Universidad de Alberta, Canadá.

Avis, B., & Sumara, D. (2006). *Complexity and Education. Inquiries into Learning, Teaching, and Research*. Mahwah, NJ, London: Lawrence Erlbaum Ass. Publ.

Bar-Yam, Y. (2004). *Making Things Work. Solving Complex Problems in A Complex World*. NECSI-Knowledge Press.

Mason, M. (2008). *Complexity Theory and The Philosophy of Education*. Wiley-Blackwell.

8.2. Complejidad y religión

Ciencia y religión. Un debate siempre abierto. Particularmente a partir del presupuesto inaugurado por los pitagóricos y transmitido después por Platón y Aristóteles y toda la tradición occidental, según el cual existirían conocimientos mejores que otros, y consiguientemente una jerarquía de saberes y discursos. Desde una perspectiva budista, y por tanto abierta, y otra católica, los libros referidos en esta sección dan cuenta de las posturas y las posibilidades para el tema de complejidad y religión.

- Pickard, S. (2004). *Creation and Complexity: Interdisciplinary Issues in Science and Religion (Science & Theology)*. ATF Press.
- Varela, F. (Ed.) (1999). *Dormir, soñar, morir. Nuevas conversaciones con el Dalai Lama*. Santiago de Chile: Dolmen.
- Varela, F., y Hayward, J. (Eds.) (1997). *Un puente para dos miradas. Conversaciones con el Dalai Lama sobre las ciencias de la mente*. Santiago de Chile: Dolmen.

8.3. Complejidad y sistemas militares

Los sistemas militares en general –por ejemplo, los estudios de insurgencia y contrainsurgencia, conflictos militares, guerras de tercera y de cuarta generación, ciencia y tecnología para la defensa y otros semejantes– han sido uno de los primeros interesados en el estudio de las ciencias de la complejidad. Es preciso decir que Estados Unidos, Inglaterra, Canadá, Francia, Alemania y la China, al mismo tiempo que Japón y Brasil (hasta donde tenemos información), trabajan activamente en este campo. Pero también debe decirse que diversos ejércitos rebeldes en el mundo también conocen y hacen uso de herramientas de complejidad. Un breve pero sólido panorama al respecto está reseñado y estudiado en los libros que se mencionan a continuación.

- Alberts, D., & Czerwinski, T. (Eds.) (1997). *Complexity, Global Politics, and National Security*. Washington, D.C.: National Defense University.
- Bar-Yam, Y. (2004). *Making Things Work. Solving Complex Problems in A Complex World*. NECSI-Knowledge Press.
- Ilichinsky, A. (2004). *Artificial War: Multiagent-Based Simulation of Combat*. Singapore: World Scientific.

8.4. Complejidad y estética

Hubo un tiempo en el que la estética formaba parte de la filosofía (incluso de la metafísica). Hoy la ciencia –análogamente a la mayoría de ciencias y disciplinas desde la modernidad– ya no pertenece al ámbito de la filosofía. Ha cobrado vida propia. Mejor aún, el arte no tiene una relación uno a uno con la estética y, por consiguiente, la estética ya no tiene como problema simplemente a la belleza. Pues bien, las ciencias de la complejidad pueden comenzar a decir algo al respecto.

Casti, J. (2003). *Art and Complexity*. London: JAI Press.

Casti, J. (1998). Complexity and Aesthetics. *Complexity*, 3 (5), 11-6.

Casti, J., & Karlqvist, A. (Eds.) (2003). *Art and Complexity*. Amsterdam: Elsevier.

Tiezzi, E. (2006). *La belleza y la ciencia. Hacia una visión integradora de la naturaleza*. Barcelona: Icaria.

Sección 9 Complejidad en Colombia

Colombia tiene un trabajo serio en ciencias de la complejidad. De una parte, es ya un hecho altamente significativo que exista Ceiba, un centro de excelencia sobre modelamiento y sistemas complejos con la participación de la Universidad Nacional de Colombia, la Universidad de los Andes, la Pontificia Universidad Javeriana y la Universidad del Rosario. Este centro está reseñado en los centros e institutos, más abajo.

Así mismo, existe una producción sostenida de varios investigadores. Y, muy importante, existe un proceso serio de formación de jóvenes investigadores a nivel de maestría y de doctorado que cada vez se enteran y ocasionalmente se dedican a la complejidad.

Aunque de bajo perfil todavía, se vienen realizando una serie de encuentros como, por ejemplo, el Encuentro Interuniversitario de Complejidad, animado inicialmente por la Universidad Distrital “Francisco José de Caldas”, la Universidad Javeriana y la Universidad del Rosario. Ya se han realizado cinco encuentros con regularidad anual y se han producido varios libros.

Con nombre propio, existen investigadores dedicados, según su área, a la complejidad: Marco Aurelio Alzate, ingeniero; Nelson Obregón N., ingeniero; Jorge Villamil, ingeniero. Pero la producción más importante es la que se reseña a continuación.

Una observación importante merece destacarse aquí. El grupo del Doctorado en Ingeniería de la Universidad de los Andes, que dirige Roberto Zarama, trabaja ciencias de sistemas. Sin embargo, la producción es de la más alta calidad, incluidos varios artículos en revistas tan prestigiosas como *Science* y *Nature*. Ya hemos dicho varias cosas antes acerca de las relaciones entre teorías sistémicas y complejidad.

9.1. Principales textos sobre complejidad en el país

En Colombia, el trabajo sobre complejidad fue inaugurado de manera consistente por dos libros de J. F. Isaza y D. Campos en biología, reconocido por

sus estudiantes y colegas, y el trabajo de E. Andrade, que no encuentra ningún parangón en el país, e incluso a nivel latinoamericano.

Andrade, E. (2009). *La ontogenia del pensamiento evolutivo*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

Andrade, E. (2003). *Los demonios de Darwin. Semiótica y termodinámica de la evolución biológica*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

Isaza, J. F., & Campos Romero, D. (2006). *Ecología: una mirada desde los sistemas dinámicos*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.

Isaza, J. F., & Campos Romero, D. (2002). *Prolegómenos a los sistemas dinámicos*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

9.2. Bibliografía sobre complejidad de Carlos E. Maldonado

Digamos aquí, sencillamente, que el primer libro sobre complejidad publicado en el país lo editó C. E. Maldonado en 1999, con segunda edición en 2001. Lo que puede decirse es que se trata de una producción consistente en el tiempo.

Artículos

(2010). Modelamiento y simulación de sistemas complejos. Documento de trabajo, Bogotá, Universidad del Rosario, conjuntamente con Nelson Gómez Cruz.

(2009a). La dimensión filosófica del mundo: la nanología. *Episteme*, 28 (julio-diciembre), en: <http://www.ilea.ufrgs.br/episteme/portal/index.php>

(2009b). Una nota sobre criptología y complejidad. *Innovar*, Universidad Nacional de Colombia (artículo aceptado); próxima publicación.

(2009c). Significado y alcance de pensar en sistema vivos. *Thelos, Revista electrónica, Universidad Tecnológica Metropolitana del Estado de Chile*, (4), 1-15, en: www.thelos.utem.cl

- (2009d). La complejidad es un problema, no una cosmovisión. *UCM Revista de Investigación*, (13), 42-54.
- (2008a). Complejidad y ciencias sociales desde el aporte de las matemáticas cualitativas. *Cinta de Moebio. Revista de Epistemología de Ciencias Sociales*, (33), 153-70, en: www.moebio.uchile.cl/33/maldonado.html
- (2008b). History and Complexity. *Filosofski Alternativi*, 5-17 (original en inglés, publicado en búlgaro).
- (2008c). Beauté et science: a la recherche de l'inconnu. *Alkemie. Revue semestrielle de littérature et philosophie*, (1), 73-9.
- (2008d). El dilema de la cohesión social: Redes sociales e instituciones. *Revista Latinoamericana de Bioética*, 8(2), 10-19.
- (2007a). De la ciencia a la filosofía y viceversa, *Cuadernos de Filosofía (UPTC)*, (9), 71-86.
- (2007b). Aprendiendo la diversidad. *Zero. Dieciocho* (Universidad Externado de Colombia), primer semestre, 22-26.
- (2007c). Comprensión positiva de las lógicas no-clásicas (4). *Zero* (Universidad Externado de Colombia), (18), 160-3.
- (2007d). Aprendiendo la diversidad. *Zero* (Universidad Externado de Colombia), (18), 22-6.
- (2007e). Comprensión positiva de las lógicas no-clásicas (4). *Zero* (Universidad Externado de Colombia), (18), 160-3.
- (2007f). ¿Qué es la biopolítica? *Doxa* (Depto. de Humanidades, USTA, Bucaramanga), 1.
- (2007g). Lógicas no-clásicas (5): la lógica cuántica. *Zero* (Universidad Externado de Colombia), (19), 164-8.
- (2006a). Lógicas no clásicas (3): lógicas paraconsistentes. *Zero* (Universidad Externado de Colombia), (17), 148-52.
- (2006b). Teoría de las catástrofes y teoría financiera. *Odeón. Observatorio de Economía y Operaciones Numéricas* (Universidad Externado de Colombia), 47-74.
- (2006c). Lógicas no clásicas (2): la lógica del tiempo. *Zero* (Universidad Externado de Colombia), (16), 124-8.
- (2005a). ¿En qué sentido puede hablarse de diálogo de las ciencias? Acerca de las nuevas ciencias de la complejidad. *Revista de la Academia de Ciencias Físicas, Exactas y Naturales*, 29, (112), 417-28.

- (2005b). Ciencias de la complejidad: ciencias de los cambios súbitos. *Odeón. Observatorio de Economía y Operaciones Numéricas* (Universidad Externado de Colombia), 85-125.
- (2005c). Lógica de contrafácticos y relaciones internacionales. *Oasis* (Universidad Externado de Colombia), (11), 5-18.
- (2005d). ¿Por qué hay múltiples lógicas? *Zero* (Universidad Externado de Colombia), (15), 112-7.
- (2005e). ¿Qué significa pensar evolutivamente?. *Zero* (Universidad Externado de Colombia), (14), 124-8.
- (2004a). La lógica del multilateralismo. Una red dinámica compleja. *Oasis. Observatorio de Análisis de los Sistemas Internacionales* (Universidad Externado de Colombia), 98-122.
- (2004b). ¿Qué son las ciencias de la complejidad? *Zero* (Universidad Externado de Colombia), (13), 106-11.
- (2003a). El problema de la filosofía del conocimiento y el estudio de los sistemas complejos. *Praxis Filosófica* (Universidad del Valle), 17, 103-20.
- (2003b). Marco teórico de trabajo en ciencias de la complejidad y siete tesis sobre la complejidad. *Revista Colombiana de Filosofía de la Ciencia*, 4, (8-9), 139-54.
- (2000). ¿Qué es la filosofía de la ciencia? El caso de la física cuántica. *Momento. Revista de Física* (Depto. de Física, Universidad Nacional de Colombia), (21), 27-43.

Libros y capítulos de libro

- (2009a). Exploración de una teoría general de la complejidad. En: C. E. Maldonado (editor académico), *Complejidad: revolución científica y teoría* (pp. 113-143). Bogotá: Editorial Universidad del Rosario.
- (2009b). Antropología, historia y complejidad (coautor). En: E. Forero, C. E. López, & C. E. Maldonado (Eds.), *Complejidad de la arqueología y el turismo cultural: territorios, sostenibilidad y patrimonio* (pp. 26-42). Bogotá: Editorial Universidad del Rosario.
- (2009c). Comentario del profesor Carlos Eduardo Maldonado a/en: E. Andrade, *La ontogenia del pensamiento evolutivo* (pp. 403-6). Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

- (2009d). Alterity and Intersubjectivity in the Midst of Mathematics and Networks (coautor). En: A. Tat, C. Valcan (editori), *Cadenta Ideilor* (pp. 148-62). Cluj-Napoca: Editura Napoca Star.
- (2009e). El problema y el reto de la interpretación en ciencia: David Bohm y la física cuántica. En: J. Giraldo et al., *Unos cuantos para todo* (pp. 339-56). Bogotá: Buinaima.
- (2009f). *Antropología y complejidad* (coeditor). Bogotá: Universidad del Rosario (en prensa).
- (2009g). History as a Complex System (coautor). En: J. P. Hogan, *History and Cultural Identity*. Washington, D.C.: Council for Research in Values and Philosophy (en prensa).
- (2009h). *Ciencias de la complejidad: teoría y aplicaciones*. Pearson-Prentice Hall (en prensa).
- (2008a). *Filosofia societății civile*. Bucarest: Editura Bastion.
- (2008b). La complejidad de la salud. Interacciones entre lo biológico y lo social En: M. C. Morales (Ed.), *Repensando la naturaleza social de la salud en las sociedades contemporáneas. Perspectivas, retos y alternativas* (pp. 96-108). Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- (2008c). Ambigüedad de lo humano: un estudio hacia la complejidad de la antropología. En: I. Calderón (Coord.), *¿Quiénes somos? Hacia una comprensión de lo humano?* (pp. 143-72). Bogotá: Universidad de la Sabana.
- (2007a). Luxury as Openness to the World. En: D. Percec, & C. Valcan (editori), *Despre Lux* (pp. 31-47). Cluj-Napoca (Rumania).
- (2007b). El problema de una teoría general de la complejidad de fractales (coautor). En: F. López Aguilar y F. Branbila Paz (Comps.), *Antropología fractal* (pp. 9-24). México, D.F.: Centro de Investigación en Matemáticas.
- (2007c). Filosofía de la ciencia y nanotecnociencia. En: J. Giraldo, E. González, F. Gómez (Eds.), *Nanotecnociencia. Nociones preliminares sobre el universo microscópico* (pp. 69-80). Bogotá: Buinaima.
- (2007d). El problema de una teoría general de la complejidad. En: C.E. Maldonado (Ed.), *Complejidad: ciencia, pensamiento y aplicaciones* (101-32). Bogotá: Universidad Externado de Colombia.
- (2007e). Complejidad y evolución. En: C.E. Maldonado (Ed.), *Complejidad: ciencia, pensamiento y aplicaciones* (17-36). Bogotá: Universidad Externado de Colombia.

- (2007f). Política y sistemas no-lineales: la biopolítica (coautor). En: B. Vela Obregón (Coord.), *Dilemas de la política* (pp. 91-142). Bogotá: Universidad Externado de Colombia.
- (2007g). La globalización como proceso: herramientas para pensar procesos. En: G. A. Ramírez Cleves (Ed.), *El derecho en el contexto de la globalización* (pp. 31-45). Bogotá: Universidad Externado de Colombia.
- (2007h). Bioética, biopolítica, bioderecho y bioeconomía: panorama práctico de la bioética. En: Varios Autores, *Bioética y biojurídica* (pp. 43-52). Tunja: Uniboyacá.
- (2007i). History as a Complex System (coautor). En: J. P. Hogan (Ed.), *History and Cultural Identity*. Washington, D.C.: Council for Research in Values and Philosophy (en prensa).
- (2006a). Complejidad y evolución. En: C.E. Maldonado (Ed.), *Complejidad: ciencia, pensamiento y aplicaciones*. Bogotá: Universidad Externado de Colombia, Universidad Nacional de Colombia, Universidad Distrital, Universidad Pedagógica Nacional, Pontificia Universidad Javeriana (en prensa).
- (2006b). El problema de una teoría general de la complejidad. En: C.E. Maldonado (Ed.), *Complejidad: ciencia, pensamiento y aplicaciones*. Bogotá: Universidad Externado de Colombia, Universidad Nacional de Colombia, Universidad Distrital, Universidad Pedagógica Nacional, Pontificia Universidad Javeriana (en prensa).
- (2005a). *Termodinámica y complejidad. Una introducción para las ciencias sociales y humanas*. Bogotá: Universidad Externado de Colombia.
- (2005b). Complejidad y ciencias sociales. El problema de la medición de los sistemas sociales humanas. En: C. E. Maldonado (Comp.), *Complejidad de las ciencias y ciencias de la complejidad* (15-56). Bogotá: Universidad Externado de Colombia.
- (2005c). Heurística y producción de conocimiento nuevo en la perspectiva CTS (coautor). En: I. Hernández (Comp.), *Estética, ciencia y tecnología. Creaciones electrónicas y numéricas* (98-127). Bogotá: Editorial Pontificia Universidad Javeriana.
- (2005d). El sexo como una expresión de la complejidad de la vida. Un ensayo de filosofía de la biología (coautor). En: Autores Varios. *Bioética y sexualidad* (pp. 143-62). Bogotá: Universidad El Bosque.

- (2004a). ¿Es posible hablar de evolución o de progreso de la calidad de la vida? (coautor). En: Autores Varios. *Calidad de vida. Enfoques, perspectivas y aplicaciones del concepto* (pp. 29-40). Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- (2004b). Explicando la sorpresa. Un estudio sobre emergencia y complejidad (coautor). En: Autores Varios. *Causalidad o emergencia. Diálogo entre filósofos y científicos* (pp. 31-63). Bogotá: Universidad de la Sabana/Sociedad Colombiana de Filosofía de la Ciencia.
- (2002a). *Filosofía de la sociedad civil*. Bogotá: Siglo del Hombre Editores/Universidad Libre.
- (2002b). *Sistemas complejos, evolución tecnológica y retos para la ética*. Bogotá: Universidad El Bosque, Cuadernos del Observatorio de la Vida.
- (2001a). Introducción. En: C.E. Maldonado (editor y coautor), *Visiones sobre la complejidad* (2ª ed., pp. 5-8). Colección “Filosofía y Ciencia”, N°. 1. Santafé de Bogotá.
- (2001b). Esbozo de una filosofía de la lógica de la complejidad. En: C.E. Maldonado (editor y coautor), *Visiones sobre la complejidad* (2ª ed., pp. 9-27), Colección “Filosofía y Ciencia”, N°. 1. Santafé de Bogotá. Reeditado en: *Información, educación y salud en la sociedad del conocimiento* (pp. 37-53). Bogotá: Colciencias/Fepafem/Academia Nacional de Medicina.

Producción bibliográfica sobre complejidad o relacionada
con complejidad

- (2006a). Ciencia y tecnología en Latinoamérica. *Zero* (Universidad Externado de Colombia), (16), 68-73.
- (2006b). Educación en ciencia y normalización. Un examen crítico (coautor). En: Varios Autores, *Conformación de un nuevo ethos cultural* (pp. 121-8). Bogotá: Asociación para la Enseñanza de la Ciencia-Buinaima.
- (2005a). ¿En qué sentido puede hablarse de diálogo de las ciencias? Acerca de las nuevas ciencias de la complejidad. *Revista de la Academia de Ciencias Físicas, Exactas y Naturales*, 29, (112), 417-28.
- (2005b). *CTS + P. Ciencia y tecnología como política pública y política social*. Bogotá: Universidad Externado de Colombia/Observatorio Colombiano de Ciencia y Tecnología.

- (2004a). Construyendo la evolución. Una defensa fuerte de la biotecnología (coautor). *Bioética y biotecnología en la perspectiva CTS* (pp. 81-104). Bogotá: Universidad El Bosque.
- (2004b). Universidad e investigación: una relación poco evidente (coautor). En: *La política universitaria en la sociedad del conocimiento* (pp. 75-96). Bogotá: Magisterio.
- (2003). *Biopolítica de la guerra y la paz*. Bogotá: Siglo del Hombre Editores.
- (2002). La lógica de los contrafácticos y la filosofía política. En: *Pluralismo, tolerancia, conflicto* (pp. 27-48). Bogotá: Instituto de Humanidades, Departamento de Filosofía, Universidad de la Sabana.
- (2001). Irracionalidad y decisión colectiva: formulación de un problema de la filosofía de las ciencias sociales. En: M. Vega, C.E. Maldonado, A. Marcos (Coords.), *Racionalidad científica y racionalidad humana. Tendiendo puentes entre ciencia y sociedad* (pp. 107-18). Valladolid: Ed. Universidad de Valladolid/Universidad El Bosque.

Sección 10

Centros de investigación, revistas, series de libros y eventos

La formación y el trabajo en ciencias de la complejidad tienen lugar al cabo de la formación de los investigadores. Así nacieron las ciencias de la complejidad y así han permanecido hasta la fecha. La historia de los primeros centros e institutos, mencionada en la introducción de este trabajo, es bastante ilustrativa al respecto. Al fin y al cabo, los mejores investigadores en el mundo forman parte de estas instancias académicas e investigativas.

La lista que se presenta abajo hace referencia a, quizás, los más destacados centros e institutos de investigación en el mundo, hoy por hoy. Ahora, desde luego que en esta lista habría que incluir el Centro de Complejidad de la Universidad de Gotteburg (Suecia), así como los institutos creados por el gobierno chino que trabajan mano a mano, por ejemplo, en los cursos de verano paralelos, con el SFI, o con el Instituto Técnico de Viena.

En América Latina, merece un lugar especial el Centro de Ciencias de la Complejidad de la UNAM. Este es, de lejos, el mejor, y nada comparable existe en ninguno de los otros países de la región. Sería deseable que las universidades del continente despertaran alguna sensibilidad al respecto.

En este cuadro, la experiencia más atrevida, a nuestro modo de ver, y por consiguiente más innovadora, es la red de complejidad organizada en Francia. En Estados Unidos no se encuentra una experiencia semejante.

10.1. Principales centros de investigación sobre complejidad en el mundo

El trabajo en complejidad es definitivamente interdisciplinar. Tal es, exactamente, la marca de la complejidad. Un investigador como R. García sostiene incluso que la interdisciplinariedad es el método mismo del trabajo en ciencias de la complejidad.

Con todo, la organización del conocimiento en el mundo entero sigue siendo paquidérmica. En efecto, el conocimiento todavía se organiza, pre-

dominantemente, en términos de facultades, carreras, departamentos y programas, y siempre con un claro talante disciplinar.

Santa Fe Institute, New Mexico, USA. <http://www.santafe.edu/>

New England Complex Systems Institute (NECSI), Cambridge, MA, USA.

<http://necsi.org/>

Center for the Study of Complex Systems, University of Michigan. Fue fundado por el famoso grupo BACH, cuyos miembros eran Arthur Burks,

Bob Axelrod, Michael Cohen y John Holland. <http://www.cscs.umich.edu/>

Réseau National des Systèmes Complexes (RNSC), Francia. <http://rnscl.fr>

Institut des Systèmes Complexes de Paris Île-de-France (ISC-PIF), Francia.

<http://iscpif.fr>

Institut des Systèmes Complexes Rhône-Alpes (ISC-PIF), Francia. [http://](http://ixxi.fr)

ixxi.fr

Center for the Study of Biological Complexity, Virginia Commonwealth University. <http://www.vcu.edu/csbc/>

Center for Complex Systems Research, University of Illinois. <http://www.ccsr.uiuc.edu/index.html>

Complex Adaptive Systems Group, Iowa State University. <http://www.cs.iastate.edu/~honavar/alife.isu.html>

Complex Systems Group, University of Alaska. <http://www.uaa.alaska.edu/complexsystems1>

Center for Social Complexity, George Mason University. <http://socialcomplexity.gmu.edu/>

Complex Systems Laboratory, Université de Montréal. <http://www.geog.umontreal.ca/syscomplex/eng/home.html>

Evolutionary and Adaptive Systems (EASy), University of Sussex. <http://www.informatics.sussex.ac.uk/research/groups/easy/index.html>

Institute for the Study of Complex Systems (ISCS). <http://www.complexsystems.org/>

LSE Complexity Group, Londres. <http://www.psych.lse.ac.uk/complexity/>

Evolution, Complexity & Cognition Group (ECCO), Universidad Libre de Bruselas. <http://pcp.lanl.gov/EVOLCOMP/>

- System of Systems Engineering Center of Excellence, Johnstown, PA, USA.
<http://www.rosece.org/>
- Human Complex Systems (ISC-PIF), University of California, Los Angeles, USA. <http://hcs.ucla.edu/>
- Bristol Center for Applied Nonlinear Mathematics, University of Bristol.
<http://www.enm.bris.ac.uk/anm/>
- Chaos UMD, University of Maryland. <http://www-chaos.umd.edu/chaos.html>
- Institute for Nonlinear Science, University of California, San Diego, USA.
<http://inls.ucsd.edu/>
- Centro de Ciencias de la Complejidad, Universidad Nacional Autónoma de México. <http://c3.fisica.unam.mx/>
- Centro de Estudios Interdisciplinarios Básicos y Aplicados en Complejidad (CeIBA-Complejidad), Colombia. <http://www.ceiba.org.co/>
- UCL Complex, University College London, London. <http://www.ucl.ac.uk/complex/>
- Complexity & Management Centre, Business School of the University of Hertfordshire. <http://complexityandmanagement.wordpress.com/>
- The Complexity & Artificial Life Research Concept (Calresco). <http://www.calresco.org/index.htm>
- Institute for the Study of Coherence and Emergence (ISCE). <http://www.isce.edu/>

10.2. Revistas especializadas sobre complejidad

En el mundo de las ciencias de la complejidad sucedió una circunstancia diferente a la de la ciencia normal. La complejidad surge con libros y con eventos, y sólo después –la mayoría hacia el año 2000– se crean las revistas especializadas. Ahora bien, es cierto que la mejor producción se publica en revistas especializadas. Pero es igualmente verdadero que en ciencias de la complejidad el proceso no ha obedecido el canon de la gestión del conocimiento de la ciencia normal.

De las revistas reseñadas a continuación, la primera es, sin lugar a dudas, la principal revista en complejidad; publica habitualmente artículos cortos, últimamente en números monográficos. Una mirada reflexiva a esta revista permite apreciar, además, el espectro de los países, grupos, campos y proble-

mas trabajados en complejidad. Las revistas relacionadas con administración y organizaciones son un tanto irregulares en periodicidad y su calidad no es comparable con la revista *Complexity* o con *Journal of Complexity*.

A esta lista de las revistas dedicadas a complejidad habría podido añadirse una lista –bastante más amplia, en diversos dominios del conocimiento– que están francamente abiertas a artículos de complejidad, en español, en inglés y en portugués. No se incluye, sin embargo, esta lista, dado que dichas revistas no están enteramente definidas en torno a las ciencias de la complejidad.

Advances in Complex Systems (ACS). Editor: World Scientific.

Complex Systems. Publicada por Complex Systems Publication.

Complexity. Editor: Wiley Blackwell.

Complexity and Innovation in Organizations. Editor: Taylor & Francis Group.

Complexity and Management. Editor: Taylor & Francis Group.

Complexity and the History of Ecomic Thought. Editor: Taylor & Francis Group.

Complexity International. Editor: Monash University.

Computational Complexity. Publicada por Birkhäuser Basel.

Ecological Complexity. Publicada por Elsevier.

Emergence: Complexity & Organization (E:CO). Publicada por Wiley Periodicals.

International Journal of Complexity in Applied Science and Engineering (IJCASE). Publicada por InderScience Publishers.

InterJournal. Publicada por el New England Complex Systems Institute.

Journal of Complexity. Editor: Elsevier Inc NY Journals.

Journal of Nonlinear Science. Publicada por Springer New York.

Journal of Social Complexity. Publicada por Bandung Fe Institute.

Journal of Systems Science and Complexity. Publicada por la Academy of Mathematics and Systems Science, Chinese Academy of Sciences. Copublicada con Springer-Verlag.

10.3. Otras revistas relacionadas con complejidad

Las revistas que se mencionan a continuación tienen que ver con varios de los campos que nacen y se alimentan de la complejidad. En esta lista hubiéramos debido incluir varias de las revistas de la base de datos de la IEEE que admiten, sin dilaciones, artículos relacionados con computación bio-inspirada, lógicas no-clásicas y computación no convencional. La razón por la que no le dedicamos un título propio es debido a su carácter abierto a ingeniería, ciencia, programación y computación tradicionales.

Adaptive Behavior. Editor: SAGE Publications.

Artificial Life. Publicada por MIT.

Artificial Life and Robotics. Publicada por Springer Japan.

Evolutionary Intelligence. Publicada por Springer Berlin / Heidelberg.

Evolving Systems. Publicada por Springer Berlin / Heidelberg.

Journal of Artificial Societies and Social Simulation. Publicada por University of Surrey.

Natural Computing. Publicada por Springer Netherlands.

Nonlinear Analysis: Modelling and Control. Publicada por Lithuanian Association of Nonlinear Analysts.

Memetic Computing. Publicada por Springer Berlin / Heidelberg.

10.4. Series de libros sobre complejidad

Dos prestigiosas editoriales se destacan con nombre propio por tener series dedicadas exclusivamente a complejidad: Springer Verlag y Cambridge University Press. Ahora, hay que decir el Instituto Santa Fe (SFI) dejó de editar sus libros con Perseus Group y logró un acuerdo con Oxford University Press. Esta editorial, sin embargo, no ha creado una serie dedicada exclusivamente a complejidad, aunque edita los mejores libros del SFI y muchos sobre varios de los temas y secciones incluidos en este estado del arte.

Recientemente, en español, la Editorial de la Universidad del Rosario (Bogotá, Colombia) creó la primera colección dedicada a complejidad, la

“Colección Complejidad”, al interior de los libros que publica de la Facultad de Administración. Hasta donde tenemos información, ésta es la primera colección de complejidad en América Latina.

Understanding Complex Systems. Publicada por Springer Berlin / Heidelberg.
Cambridge Nonlinear Science Series. Publicada por Cambridge University Press.

Serie Metatemas. Publicada por Tusquets.

Colección Complejidad. Editorial Universidad del Rosario, Bogotá, Colombia.

10.5. Eventos sobre complejidad y campos afines

La internacionalización de los eventos sobre ciencias de la complejidad muestra un vigor admirable. Varios eventos se cruzan y son numerosos los investigadores que, en el circuito de conferencias, participan en varios de los eventos referidos a continuación. Las principales universidades del mundo –por ejemplo, atendiendo a la lista de las 500 Universidades de la lista de Shanghai– participan y organizan varios de estos eventos. En ellos, es evidente la participación de investigadores del sector privado, del sector público y de la sociedad civil.

Asia-Pacific Complex Systems Conference.

Complex Systems Design & Management (CSDM).

European Conference on Complex Systems (ECCS).

IEEE International Conference on Engineering of Complex Computer Systems.

International Conference on Complex Sciences (Complex).

International Conference on Complex Systems.

International Conference on Complex Systems Engineering (Iccse).

Vida artificial

International Conference on Artificial Life (ALife).
European Conference on Artificial Life (ECAL).
German Workshop on Artificial Life (GWAL).
International Symposium on Artificial Life and Robotics (AROB).
Italian Workshop on Artificial Life (WIVA).
Australian Conference on Artificial Life (ACAL).
Regional Conference on Artificial Life and Robotics –Tailandia–.
European Workshop on Artificial Life and Robotics.
IEEE Symposium on Artificial Life (IEEE-ALife).
International Conference on Life System Modeling and Simulation (LSMS).

Computación evolutiva, hardware evolutivo y robótica evolutiva

Genetic and Evolutionary Computation conference (Gecco).
IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC).
International Conference on Evolutionary Computing (EC).
European Conference on Evolutionary Computation (EvoBIO).
European Conference on Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization (EVOCOP).
International Workshop on Genetic and Evolving Fuzzy Systems (GEFS).
Asia-Pacific Workshop on Genetic Programming (ASPGP).
International Workshop on Foundations of Genetic Algorithms (FOGA).
Euro-Genetic-Programming Conference (EuroGP).
Workshop on Genetic Programming Theory and Practice (GPTP).
European Conference on Artificial Evolution (AE).
International Conference on Evolvable Systems (ICES).
NASA/DoD Conference on Evolvable Hardware (EH).
NASA/ESA Conference on Adaptive Hardware and Systems (AHS).

Inteligencia de enjambres

IEEE Swarm Intelligence Symposium.
International Conference on Swarm Intelligence (ICSI).
International Conference on Computational Collective Intelligence (Iccci).

International Workshop on Ant Colony Optimization and Swarm Intelligence (ANTS).

Workshop on Collective Intelligence on Semantic Web (CISW).

Sistemas inmunes artificiales

International Conference on Artificial Immune Systems (Icaris).

Autómatas celulares

International Conference on Cellular Automata for Research and Industry (ACRI).

International Workshop on Cellular Automata (Automata).

Computación molecular

Workshop on Membrane Computing (WMC).

International Workshop on Computational Models for Cell Processes (CompMod).

Workshop on Membrane Computing and Biologically Inspired Process Calculi.

Workshop on Computational Models for Cell Processes.

The International Meeting on DNA Computing (DNA).

International Workshop on Computing with BioMolecules (CBM).

Computación natural

International Conference on Natural Computation (ICNC).

International Workshop on Natural Computing (IWNC).

International Conference on Bio-Inspired Computing: Theories and Applications (BIC-TA).

World Congress on Nature and Biologically Inspired Computing (NaBIC).

International Workshop on Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization (Nico).

Conference on Biocomputing and Emergent Computation (BCEC).

The International Workshop Bio-Inspired Computing and Communications (BICC).

Inteligencia computacional

International Conference on Computational Intelligence (ICCI).

International Conference on Computational Intelligence and Cognitive Informatics (Iccici).

Sistemas bio-inspirados

International Symposium on Bioinformatics Research and Applications (Isbra).

International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems (SASO).

International Conference on Adaptive and Intelligent Systems (Icais).

International Conference on Parallel Problem Solving from Nature (PPSN).

International Conference on Bio-Inspired Models of Network, Information and Computing Systems (Bionetics).

The European Symposium on Artificial Neural Networks (Esann).

International Conference on Intelligent Autonomous Systems (IAS).

Modelamiento, simulación y agentes

European Workshop on Multi-Agent Systems (Eumas).

IEEE International Conference on Social Computing (SocialCom).

Complex Systems Modelling and Simulation Workshop.

Computación no-convencional

Workshop on Emergent Computing (EmC).

International Conference on Unconventional Computation (UC).

IEEE workshop on Organic Computing (IEEE-OC).

Bioinformática

IEEE International Conference on Bioinformatics and Biomedicine (IEEE BIBM).

Sociedades sobre complejidad

El mundo de las ciencias de la complejidad es nuevo, reciente, joven. Y sin embargo, la existencia de distintas sociedades sobre complejidad es una señal más que suficiente acerca del interés –múltiple– acerca de la complejidad. Con seguridad, con total seguridad, se trata de un campo promisorio, que aún deberá atraer a la mayoría de la comunidad académica y científica. Pero cuando ello suceda, si es que llega a tener lugar, las ciencias mismas se habrán transformado, y con ellas el destino mismo de la humanidad y de la vida sobre el planeta. Somos optimistas al respecto.

Complex Systems Society. <http://css.csregistry.org/tiki-index.php>

ASSYST complex systems Society. <http://www.assystcomplexity.eu/>

International Society for Complexity, Information, and Design (ISCID).

<http://www.iscid.org/>

The Complexity Society, Business School, University of Hertfordshire, UK.

<http://www.complexity-society.com/>

International Society for Adaptive Behavior. <http://www.isab.org/>

International Society of Artificial Life. <http://www.alife.org/>

Sección 11

Bibliografía general introductoria a la complejidad

11.1. Bibliografía en español

No existe libro de introducción global a las ciencias de la complejidad. Dado el panorama que precede, se entenderá fácilmente la dificultad. En el medio universitario y académico francés, la editorial P.U.F. (Presses Universitaires de France), tiene una serie de libros estupendos de introducción: *Que sais-je?* La editorial alemana *Wissenschaftliche Buchgesellschaft* tiene una serie de libros de introducción a diversos temas de muy alta calidad. En español no existe nada semejante. Sin embargo, los libros referidos a continuación constituyen una buena introducción a las ciencias de la complejidad. En ese sentido, la Editorial Tusquets ha cumplido un trabajo más que admirable en la divulgación de la ciencia y, notablemente, en la publicación de libros sobre complejidad. Entre los títulos que ha editado se encuentran libros de fondo (alguno de S. Kauffman) y de divulgación de muy buen nivel. La deuda de la comunidad de complejólogos que no dominan el inglés para con Tusquets es grande. Con asterisco (*) se muestran aquellos textos técnicos y, por tanto, de más difícil lectura.

- Briggs & Peat (1999). *Las siete leyes del caos*. Barcelona: Tusquets.
- Fernández Díaz, A. (1994). *La economía de la complejidad. Economía dinámica caótica*. Madrid: McGraw Hill.
- García, R. (2006) *Sistemas complejos. Conceptos, método y fundamentación de la investigación interdisciplinaria*. Barcelona: Gedisa.
- Gell-Mann, M. (1996). *El quark y el jaguar. Aventuras en lo simple y lo complejo*. Barcelona: Tusquets.
- Gribbin, J. (2006). *Así de simple. El caos, la complejidad y la aparición de la vida*. Barcelona: Crítica.
- Lewin, R. (1995). *Complejidad. El caos como generador del orden*. Barcelona: Tusquets.

- Maldonado, C.E. (2001). ¿Qué es la filosofía de la ciencia? El caso de la física cuántica. *Momentum* (Depto. de Física, Universidad Nacional de Colombia), (20), 27-43.
- Maldonado, C.E. (Ed.) (2001). *Visiones sobre la complejidad* (2ª ed.). Bogotá: Universidad El Bosque.
- Maldonado, C.E. (2000). Ideas acerca de la historia y futuro de las relaciones entre ciencia y filosofía. En: M. Rujana, (Comp.), *Problemas actuales de la filosofía*. Bogotá: Universidad Libre.
- Maldonado, C.E. (1999). El programa contra el dualismo de R. Penrose. *Universitas Philosophica*, (31), 31-54.
- (*)Mandelbrot, B. (1996). *Los objetos fractales. Forma, azar y dimensión*. Barcelona: Tusquets.
- (*)Mandelbrot, B.(1990). *Geometría de fractales*. Barcelona: Tusquets.
- (*)Maturana, H., Varela, F. (1990). *El árbol del conocimiento. Las bases biológicas del conocimiento humano*. Madrid: Debate.
- (*)Murphy & O'Neill (Eds.) (1999). *La biología del futuro*. Barcelona: Tusquets.
- (*)Nicholis, G., & Prigogine, I. (1987). *La estructura de lo complejo. En el camino hacia una nueva comprensión de las ciencias*. Madrid: Alianza.
- Pagels, H. (1991). *Los sueños de la razón. El ordenador y los nuevos horizontes de las ciencias de la complejidad*. Barcelona: Gedisa.
- (*) Prigogine, I. (1999). *Las leyes del caos*. Barcelona: Crítica.
- Prigogine, I. (1997). *El fin de las certidumbres*. Santiago de Chile: Andrés Bello.
- Prigogine, I. (1993). *El nacimiento del tiempo*. Barcelona: Tusquets.
- Prigogine, I. (1993). ¿Tan sólo una ilusión? Una exploración del caos al orden. Barcelona: Tusquets.
- Prigogine, I., Stengers, I. (1983). *La nueva alianza. Metamorfosis de la ciencia*. Madrid: Alianza.
- Stewart, I. (1998). *De aquí al infinito*. Barcelona: Crítica/Drakontos.
- Stewart, I., & Golubitsky, M. (1995). ¿Es Dios un geómetra? Barcelona: Crítica.
- Wagensberg, J. (1994). *Ideas acerca de la complejidad del mundo*. Barcelona: Tusquets.

11.2. Bibliografía en inglés

En contraste con la situación en español, existen libros más integrales y sólidos de introducción a las ciencias de la complejidad en inglés. A continuación se mencionan varios que tienen, con todo, un énfasis particular. Digamos más bien otra cosa: la siguiente bibliografía es absolutamente fundamental para un trabajo serio en investigación sobre complejidad. Los trabajos que hacen parte de ella son la *conditio sine qua non* del trabajo en complejidad. Análogamente a la sección anterior, el asterisco (*) indica los textos técnicos.

- Atreya, C. E. (2004). *Invisible Cities. A Metaphorical Adaptive System*. Ann Arbor: Festina Lente.
- (*)Axelrod, R. (1997). *The Complexity of Cooperation. Agent-Based Models of Competition and Collaboration*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Axelrod, R. (1984). *The Evolution of Complexity*. New York: Basic Books.
- (*)Axelrod, R., & Cohen, M. (1999). *Harnessing Complexity. Organizational Implications of a Scientific Frontier*. New York: The Free Press.
- (*)Badii, R., & Politi, A. (1997). *Complexity. Hierarchical Structures and Scaling in Physics*. Cambridge University Press.
- (*)Bak, P. (1996). *How Nature Works. The Science of Self-Organized Criticality*. New York: Springer Verlag.
- (*)Bar-Yam, Y. (1997). *Dynamics of Complex Systems*. Addison-Wesley.
- Barabási, A.-L. (2002). *Linked. How Everything Is Connected to Everything Else and What It Means for Business, Science, and Everyday Life*. Plume – Penguin Books.
- Bird, R. J. (2003). *Chaos and Life. Complexity and Order in Evolution and Thought*. New York: Columbia University Press.
- Bossomaier, T., & Green, D. (1998). *Patterns in the Sand. Computers, Complexity, and Everyday Life*. Reading, MA: Perseus Books.
- Casti, J. (1995). *Complexification. Explaining a Paradoxical World Through the Science of Surprise*. New York: Harper.
- Casti, J. (1990). *Paradigms Lost. Tackling the Unanswered Mysteries of Modern Science*. New York: Avon Books.

- Cohen, J., & Stewart, I. (1994). *The Collapse of Chaos. Discovering Simplicity in a Complex World*. Penguin Books.
- (*)Cowan, G., Pines, D., & Melzter, D. (Eds.) (1999). *Complexity. Metaphors, Models, and Reality*. Cambridge, MA: Perseus Books.
- Chaisson, E. J. (2001). *Cosmic Evolution. The Rise of Complexity in Nature*. Harvard University Press.
- Hayles, N. K. (Ed.) (1991). *Chaos and Order. Complex Dynamics in Literature and Science*. Chicago & London: The University of Chicago Press.
- Holland, J. (1998). *Emergence. From Chaos to Order*. Reading, MA: Addison-Wesley.
- (*) Holland, J. (1995). *Hidden Order. How Adaptation Builds Complexity*. Reading, MA: Perseus Books.
- (*)Holland, J. (1992). *Adaptation in Natural and Artificial Systems. An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence*. The MIT Press.
- (*) Kauffman, S. (2000). *Investigations*. Oxford University Press.
- (*)Kauffman, S. (1995). *At Home in the Universe. The Search for the Laws of Self-Organization and Complexity*. Oxford University Press.
- (*)Kauffman, S. (1993). *The Origins of Order. Self-Organization and Selection in Evolution*. Oxford University Press.
- Kellert, S. H. (1993). *In the Wake of Chaos. Unpredictable Order in Dynamical Systems*. Chicago/London: The University of Chicago Press.
- Mainzer, K. (1998). *Thinking in Complexity*. Springer Verlag.
- Morowitz, H. J. (2002). *The Emergence of Everything. How the World Became Complex*. Oxford: Oxford University Press.
- (*)Novak, M. A. (2006). *Evolutionary Dynamics. Exploring the Equations of Life*. Cambridge, MA & London: The Belnap Press of Harvard University Press.
- (*)Penrose, R. (1994). *Shadows of the Mind. A Search for the Missing Science of Consciousness*. Oxford: Oxford University Press.
- Penrose, R. (1990). *The Emperor's New Mind. Concerning Computers, Minds, and the Laws of Physics*. London: Vintage.
- (*) Prigogine, I. (1980). *From Being to Becoming. Time and Complexity in the Physical Sciences*. San Francisco: W. H. Freeman and Co.
- Rae, A., (1998). *Quantum Physics: Illusion or Reality?* Cambridge: Cambridge University Press.

- Rescher, N. (1998). *Complexity. A Philosophical Overview*. New Brunswick (USA) & London (UK): Transaction Publishers.
- Resnick, M. (1997). *Turtles, Termites, and Traffic Jams. Explorations in Massively Parallel Microworlds*. Cambridge, MA/London: The MIT Press.
- Richardson, K. A., Goldstein, J. A., Allen, P. M., & Snowden, D. (Eds.) (2005). *Emergence, Complexity and Organization. E:CO ANNUAL, Vol. 6*. Mansfield, MA: ISCE.
- (*)Sastry, S. (1999). *Nonlinear Systems. Analysis, Stability, and Control*. Springer Verlag.
- Schneider, E. D., & Sagan, D. (2005). *Into the Cool. Energy Flow, Thermodynamics, and Life*. Chicago & London: The University of Chicago Press.
- Strevens, M. (2003). *Bigger than Chaos. Understanding Complexity through Probability*. Cambridge, MA/London: Harvard University Press.
- Waldrop, M. (1992). *Complexity. The Emerging Science at the Edge of Chaos*. New York: Simon & Schuster.
- Watts, D. (2003). *Six Degrees. The Science of a Connected Age*. New York: W. W. Norton & Co.
- Zimmerli, W. Ch., & Sandbothe, M. (1993). *Klassiker der modernen Zeitphilosophie*. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
- (*)Zurek, W. H. (Ed.) (1990). *Complexity, Entropy and the Physics of Information*. Perseus Books.

Postfacio

Debemos hacer una observación fundamental de salida. Este es el estado del arte. Pero aquí sería absolutamente necesario mencionar una serie de autores que se encuentran entre los pilares o los antecedentes de las ciencias de la complejidad. La siguiente lista quiere ser, sencillamente, un reconocimiento, de todos aquellos, *de manera directa*, sin los cuales no habrían sido posibles las ciencias de la complejidad. En orden cronológico, ellos son:

Henri Poincaré.

David Hilbert.

Alan Turing.

Kurt Gödel.

John von Neumann.

Stephen Smale.

Per Bak.

Este estado del arte corresponde a un proyecto de investigación fundamental en el que participamos varios amigos y colegas en el trabajo de creación y fortalecimiento de una red de trabajo en complejidad a nivel nacional e internacional.

Este estado del arte implica desde ya una segunda versión que estará enteramente dedicada al estudio de indicadores de ciencimetría y de epistemometría (una propuesta novedosa de N. Rescher que no ha sido atendida por organismos públicos o privados de ciencimetría hasta la fecha). Planeamos esta segunda versión para dentro de un año, aproximadamente. Sin embargo, es claro que de aquí a entonces habrá nueva producción intelectual en estos y, seguramente, en otros campos. De suerte que, al mismo tiempo que actualizaremos este trabajo sistemáticamente, el mismo también estará acompañado por el esfuerzo de ciencimetría, atendiendo a la vez al diálogo cruzado de los manuales de Frascati, Canberra, Oslo, Bogotá y Lisboa (y lo que eventualmente haya de seguirse de ellos). Queremos así hacer una contribución a la comunidad académica y científica continuada en el tiempo. Entre tanto, como es habitual en estos casos, deberemos seguir con nuestros propios compromisos de producción intelectual y académica.



Universidad del Rosario
Facultad de Administración



