

DOCUMENTOS DE INVESTIGACIÓN

Facultad de Administración

No. 66, ISSN: 0124-8219
Febrero de 2010

Modelamiento y simulación de sistemas complejos

Carlos Eduardo Maldonado
Nelson Alfonso Gómez Cruz



Universidad del Rosario
Facultad de Administración

Modelamiento y simulación de sistemas complejos

Documento de Investigación No. 66

Carlos Eduardo Maldonado
Nelson Alfonso Gómez Cruz

Centro de Estudios Empresariales para la Perdurabilidad – CEEP
Grupo de Investigación en Perdurabilidad Empresarial
Laboratorio de Modelamiento y Simulación (LM y S)
Línea de Investigación en Complejidad y Organización

Universidad del Rosario
Facultad de Administración
Laboratorio de Modelamiento y Simulación
Editorial Universidad del Rosario
Bogotá D.C.
Febrero 2010

Maldonado, Carlos Eduardo

Modelación y simulación de sistemas complejos / Carlos Eduardo Maldonado y Nelson Alfonso Gómez Cruz.—Facultad de Administración., Centro de Estudios Empresariales para la Perdurabilidad – CEEP. Bogotá: Editorial Universidad del Rosario, 2010.

32 p.—(Documento de Investigación; 66).

ISSN: 0124-8219

Administración – Métodos de simulación / Administración – Modelos matemáticos / Administración de empresas / Métodos de simulación / Simulación por computadores / I. Gómez Cruz, Nelson Alfonso / II. Título / III. Serie.

658.40352 SCDD 20

Carlos Eduardo Maldonado, Nelson Alfonso Gómez Cruz

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: febrero de 2010

Impresión: Javegraf

Impreso y hecho en Colombia

Printed and made in Colombia

Contenido

Introducción	5
Modelamiento y simulación	7
Problemas P y N-P	11
Brevemente: las ciencias de la complejidad.....	14
¿Qué es un modelo?	17
Computación bio-inspirada e ingeniería de sistemas complejos.....	20
Conclusiones.....	29
Glosario	30
Referencias bibliográficas.....	31

Introducción

De manera tradicional se ha afirmado que existen dos formas de ciencia: una basada en la inducción y otra fundada en deducciones o, lo que es equivalente, en criterios y principios hipotético-deductivos. La primera ha sido conocida como ciencia empírica y su problema fundamental es el de la inducción; es decir, el de establecer cuáles, cómo y cuántas observaciones (o descripciones) particulares son suficientes (y/o necesarias) para elaborar generalizaciones. Esta es una clase de ciencia que trabaja a partir de observaciones, descripciones, acumulación de evidencias, construcción de datos, y demás, a partir de los cuales puede elaborar procesos de generalización o universalización. Este tipo de ciencia coincide con los fundamentos de toda la racionalidad occidental, a partir de Platón y Aristóteles, según la cual sólo es posible hacer ciencia de lo universal.

Por su parte, el segundo tipo de ciencia consiste en la postulación de principios primeros o axiomas, y se concentra en el estudio de las consecuencias –igualmente, de los alcances– de dichos principios. Esta clase de ciencia tiene como problema fundamental la demostración de determinados fenómenos, valores, aspectos, dicho en general; y esto se fundamenta en el rigor con el que se han postulado los axiomas y los teoremas subsiguientes. Por derivación, esta clase de ciencia incorpora y trabaja con lemas y otros planos semejantes. Cultural o históricamente, esta clase de ciencia se inicia con la lógica de Aristóteles y se sistematiza por primera vez en la geometría de Euclides. Toda la ciencia medieval, llamada *theologia*, opera de esta manera.

En el marco de la ciencia contemporánea estas dos clases de ciencia se pueden ilustrar profusamente. En el primer caso, por ejemplo, desde el derecho que afirma que las evidencias se construyen; las ciencias forenses (antropología forense, odontología forense y demás) que sostienen algo semejante; o el periodismo y la comunicación social que trabajan a partir del reconocimiento de que la noticia no existe, sino que se construye (vía la crónica, la reportería y otras). De otra parte, en el segundo caso, desde las matemáticas y la lógica hasta las ciencias y las disciplinas que incorporan parámetros y metodologías basadas en hipótesis. (Vale la pena recordar siempre aquella idea clásica del propio I. Newton de acuerdo con la cual la buena ciencia y en las palabras de Newton: *hypotheses non fingo*).

Pues bien, por caminos, con motivaciones y con finalidades diferentes y múltiples, recientemente ha emergido una tercera clase de ciencia, que ya no trabaja con base en la inducción y en la deducción, sino de una manera radicalmente distinta. Esta tercera manera es el modelamiento y la simulación, y la forma más acabada de esta ciencia son las ciencias de la complejidad.

Modelamiento y simulación

El modelamiento y la simulación consisten en el trabajo con el computador y, más específicamente, en el trabajo con o el desarrollo de software para, justamente, modelar y simular. Las aplicaciones de software pueden ser comprendidas sucintamente en los siguientes términos:

Existe el *software propietario*, el *software libre* y el *software de dominio público* (sin licencia)¹. En el caso particular de la computación científica, empresarial y de negocios, los productos de software propietario son todos aquellos que trabajan bajo *licencias de código cerrado*, tales como Mathematica, MatLab, EcoSim, Arena, IThink, Stella, ProModel, Visim y muchos más. No podemos hacer uso de estos productos sin pagar las licencias, además, por lo general, no es permitido (= legal) modificar, desensamblar, copiar o distribuir dicho software. El software libre, por su parte, permite todo aquello que el software propietario no admite, salvo algunos compromisos o restricciones contractuales (como poner al servicio del público las mejoras realizadas a un producto dado o que dichas modificaciones posean, a su vez, licencias tecnológicamente neutrales). Las licencias para el software libre se pueden clasificar en *licencias de código abierto permisivas* y *licencias de código abierto robustas* e incluyen productos de software como SciLab, E-Cell Simulation Environment, Swarm, Simex, Biome, Cage, ParadisEO².

Los productos de software, a su vez, modelan o simulan objetos y series o procesos. En el primer caso se trata básicamente del trabajo mediante el cual logramos modelar o simular objetos en tres dimensiones y podemos rotarlos. En el segundo caso, el tema es el de la simulación o modelamiento, esencialmente, de series de tiempo.

La primera advertencia que cabe hacer es que no por hablar de modelamiento y de simulación se trabaja necesariamente con fenómenos y sistemas complejos. Existe, manifiestamente, modelamiento y simulación de fenómenos lineales, de procesos rígidos y centralizados, en fin de dinámicas

¹ La distinción entre el software propietario y el software libre es, ulteriormente, un tema político. Existe un fuerte y sólido debate al respecto con fundamentos teóricos consistentes. Sin embargo, el tema debe quedar aquí de lado. Baste decir que, en el plano ético, se trata de la distinción entre hackers y crackers (así como entre *white hat hackers* y *black hat hackers*). Otras distinciones más sutiles son los *samurai*, *wannabis*, *phreakers*, *newbies* y *losers*.

² ParadisEO es un software de gran interés para el trabajo con metaheurísticas.

deterministas. En contraste, el modelamiento y la simulación en contextos de complejidad es una circunstancia perfectamente novedosa y tiene como base, más que el trabajo de programación con el computador, el conocimiento, el estudio y el trabajo con sistemas complejos no-lineales *con la ayuda* del computador.

En efecto, el computador es una herramienta conceptual que permite el trabajo con problemas algorítmicos y con problemas computacionales. El trabajo con ambos tipos de problemas implica, exige, en ocasiones, el trabajo con programación. Al margen de esto, el uso habitual del computador es como el de una máquina de escribir más desarrollada.

El modelamiento y la simulación suponen, exigen o implican un trabajo (previo) de formalización matemática. Pero esta no es una regla. En ocasiones, la matematización puede venir posteriormente como una verificación o una demostración de lo que se ha modelado o simulado. Lo que sí es imperativo es reconocer que la simulación y el modelamiento demandan un trabajo conceptual y/o teórico previo que conduce precisamente a la necesidad de considerar problemas algorítmicos o computacionales, computacionalmente tratados, justamente.

R. Axelrod así lo expone:

“The complexity of agent-based modeling should be in the simulated results, not in the assumptions (...). A simulation of the economy aimed at predicting interest rates three months into future needs to be as accurate as possible. For this purpose the assumptions that go into the model may need to be quite complicated. Likewise, if a simulation is used to train the crew of a supertanker or to develop tactics for a new fighter aircraft, accuracy is important and simplicity of the model is not. But if the goal is to deepen our understanding of some fundamental process, then simplicity of the assumptions is important, and realistic representation of all the details of a particular setting is not” (Axelrod, 1997, 5), (subrayado, C.E.M.)³.

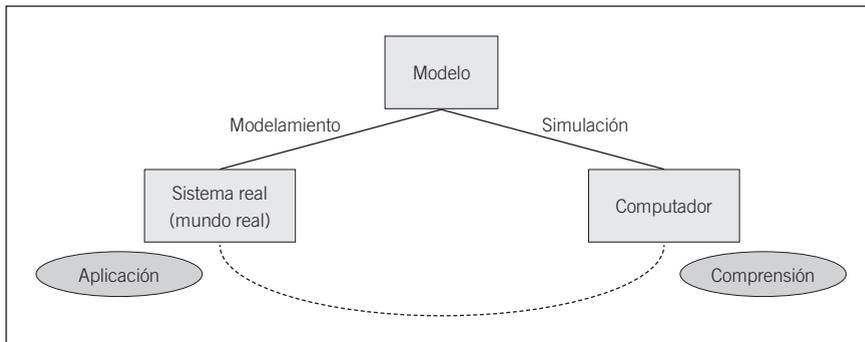
³ “La complejidad del modelamiento basado en agentes debería estar en los resultados simulados, no en las asunciones del modelo (...). Una simulación de la economía que busca predecir tasas de interés con tres meses de anticipación requiere ser tan rigurosa como sea posible. Por esta razón, se puede requerir que las asunciones que entran en el modelo sean bastante complicadas. Asimismo, si una simulación se usa para entrenar al equipo de un supertanque, o para desarrollar tácticas para un nuevo avión de combate, la precisión es importante y no la simplicidad del modelo. Pero si la meta consiste en profundizar nuestra comprensión de algún proceso fundamental, entonces la simplicidad de las asunciones es importante y no la representación realista de todos los detalles de una determinada construcción” (traducción, C.E.M.).

En términos más elementales, cuando buscamos *explorar* o *comprender* procesos fundamentales, los modelos deben ser juzgados por cuán fructíferos son, no por su precisión o exactitud. Pero, cuando la finalidad es anticipar productos o procesos con una *finalidad eminentemente práctica*, lo importante entonces es la *precisión* o el *rigor* del modelamiento o la simulación.

Esta observación contribuye enormemente para abocar una distinción metodológica fundamental entre la investigación o experimentación in silico, in vivo o in vitro. La distinción entre ellas estriba en la finalidad que se busca, si se trata de comprensión o aplicación y anticipación con finalidad práctica.

El siguiente esquema permite, por tanto, una distinción entre modelamiento y simulación:

Figura 1. Distinción entre modelamiento y simulación.
Ampliado desde Ríos, Ríos, Jiménez, Jiménez, 2009.



En general modelamos o simulamos con tres finalidades:

- a) Cuando buscamos comprender (y explicar) procesos fundamentales;
- b) Cuando queremos que un fenómeno o sistema se comporte como deseamos/desearíamos;
- c) Cuando queremos lograr ver emergencias, dinámicas, procesos, elementos y demás que no logramos ver (= comprender) habitualmente; es decir, justamente, por fuera de la simulación y el modelamiento.

En términos generales, dada la novedad de las ciencias de la complejidad y el estudio de los sistemas de complejidad creciente, en el tema o el problema de comprender dinámicas fundamentales –por ejemplo, la propia compleji-

zación creciente de un fenómeno, las sinergias y emergencias presentes o potenciales, la autoorganización real o virtual y la explicación de la misma, en fin, las turbulencias, inestabilidades y rupturas de simetría— el modelamiento y la simulación son del primer tipo mencionado.

En el segundo caso, el tema al que conducen el modelamiento y la simulación es el de la importancia de las metaheurísticas. En este sentido, el trabajo con metaheurísticas implica claramente no la búsqueda de una solución (específica o determinada) a un problema, sino, mejor aún, el trabajo de exploración con espacios de soluciones o, lo que es equivalente, con conjuntos y redes de soluciones. Desde este punto de vista, lo que el investigador busca es que el sistema o fenómeno de estudio se comporte como él desearía. Así, se pone de manifiesto el fundamento mismo de toda modelación y simulación, a saber: *la intuición —estrictamente, las pompas de intuición— y los experimentales son los nutrientes mismos del modelamiento y simulación de los sistemas complejos.*

Por su parte, la tercera finalidad de la simulación y el modelamiento pone de manifiesto la distinción —no banal— entre computación gráfica, de un lado, y el modelamiento y la simulación propiamente dichos, ya que una cosa es graficar —por ejemplo, en representaciones bidimensionales o tridimensionales; incluso en graficación que se corre en el tiempo— un texto, un concepto o un problema y otra, absolutamente distinta, el modelamiento y la simulación. El rasgo más sobresaliente de esta distinción radica en el reconocimiento explícito de que —particularmente en el contexto del estudio de sistemas complejos no-lineales— la simulación y el modelamiento contribuyen a la *comprensión* del fenómeno de estudio (y no simplemente a la visualización del tema o del problema considerado).

Problemas P y N-P

En 1972, S. Cook, R. Karp y L. Levin descubrieron lo que se denomina la teoría matemática de la complejidad⁴. Sucintamente, esta teoría consiste en el estudio de las relaciones entre P y $N-P$.

P designa el conjunto de problemas que se conocen como polinomiales. Se dice que un problema es polinomial cuando puede ser: a) abordado, estudiado o comprendido y b) resuelto en términos polinomiales, es decir, descomponiendo el problema en los términos que lo componen. Quizás la mejor expresión de esta clase de problemas es el conjunto de organigramas, flujogramas, cronogramas, histogramas, cladogramas y demás herramientas que son justamente la comprensión de un problema (= estructura, dinámica) en términos analíticos y de agregados de partes. En una palabra, P designa toda la clase de problemas que implican necesariamente un tiempo polinomial, por ejemplo, un tiempo que es susceptible de ser dividido en lustros, años, meses, semanas u horas. Los problemas P se designan como problemas fáciles en general y, dicho en términos matemáticos, se dice que son *irrelevantes* precisamente porque se pueden resolver.

Por su parte, los problemas $N-P$ son todos aquellos problemas no-polinomiales que, por consiguiente, no pueden ser ni abordados ni resueltos por vía de la fragmentación del problema (en los términos que componen al mismo). Para los problemas $N-P$ no existe ningún tiempo polinomial que pueda resolverlos. Por el contrario, esta clase de problemas remiten a otros tipos de temporalidad, ciertamente no analítica. Esta clase de problemas se conocen como problemas difíciles y se designan como problemas *relevantes*.

En términos algorítmicos, mientras que un problema de la clase P puede ser resuelto por un algoritmo de tiempo polinomial en una máquina determinista, los problemas de la clase $N-P$ requieren algoritmos no convencionales, o mejor, no deterministas para resolver el problema en tiempos igualmente polinomiales, aunque de forma aproximada (Talbi, 2009).

⁴ El problema de las relaciones P y $N-P$ constituye uno de los siete problemas que, conjuntamente con otros seis, ha llegado a agruparse con el título genérico de los Problemas Premios del Milenio, en el sentido de ser los problemas últimos constitutivos de las matemáticas. Estos siete problemas son: la conjetura de Birch y Swinterton-Dyer, la conjetura de Hodge, las ecuaciones Navier-Stokes, los problemas P y $N-P$, la conjetura de Poincaré, la hipótesis de Riemann y la teoría de Yang-Mills.

Pues bien, la teoría matemática de la complejidad estriba exactamente en las relaciones entre P y $N-P$. Los problemas P y $N-P$ constituyen los parámetros, por así decirlo, del trabajo en modelamiento y en simulación de sistemas complejos y, en general, del estudio y la investigación sobre ciencias de la complejidad.

Los problemas que conforman la teoría matemática de la complejidad son igualmente conocidos como problemas de complejidad computacional. Son todos aquellos problemas que consisten en el estudio del tiempo de computación para la resolución de los mismos y, en general, contrastan con los problemas que implican complejidad algorítmica y que son aquellos que demandan la consideración del programa más breve para la resolución de los mismos.

El siguiente esquema de relaciones contiene, de manera breve, la serie de problemas constitutivos de la teoría matemática de la complejidad:

$$P = N-P$$

$$P \neq N-P$$

$$N-P \geq P$$

$$P \in N-P$$

Los problemas P y $N-P$ se articulan como problemas $N-P$ difíciles (*Hard $N-P$ problems*) y como problemas $N-P$ completos (*$N-P$ complete problems*) y, por consiguiente, hacen referencia a la tercera y a la cuarta de las relaciones mencionadas en el esquema anterior.

Pues bien, el tema consiste exactamente en el hecho de que ninguna de estas relaciones ha podido ser confirmada o negada hasta la fecha. Una parte de las mejores mentes de filósofos, matemáticos, lógicos y expertos en sistemas computacionales trabajan en la resolución de estas relaciones.

La idea básica al respecto es que no deben separarse P y $N-P$, como si hubiera que abordar y acaso satisfacerse, con justificaciones metodológicas, de tiempo, de recursos, pragmáticas u otras, con los problemas fáciles que son efectivamente resolubles, y luego, acaso, eventualmente, pudiéramos o debiéramos avanzar hacia los problemas difíciles. En la vida, como en la ciencia, la tragedia estriba en el hecho de que siempre abordamos primero los problemas fáciles y delegamos, postergamos o relegamos los problemas difíciles. El drama consiste en el hecho de que los problemas difíciles al cabo se revelan como los verdaderamente significativos desde varios puntos de vista.

Como quiera que sea, el trabajo en complejidad consiste en identificar ambas clases de problemas y avanzar lo más rápidamente posible de los problemas P hacia los problemas $N-P$ (este tema exige otro texto consistente en el estudio de los problemas de complejidad computacional, el cual está siendo preparado por nosotros en este momento y podrá ser publicado más adelante). Exactamente en este sentido y dirección, el modelamiento y la simulación se revelan como la mejor herramienta y, si se prefiere, como “el” método cuando se trata de problemas, sistemas, fenómenos y comportamientos complejos. Sin ambages: la metodología en complejidad atraviesa transversalmente por el trabajo con problemas de complejidad algorítmica y de complejidad computacional.

Brevemente: las ciencias de la complejidad

Las ciencias de la complejidad⁵ son fundamentalmente el resultado del desarrollo del computador y se puede decir, sin dificultad, que tanto obedecen a la existencia y al trabajo con computación, como que contribuyen, a su vez, al desarrollo de la computación y en general de los sistemas informáticos (o informacionales). H. Pagels (1991) fue el primero en advertir expresamente esta circunstancia.

Las ciencias de la complejidad se encuentran en la base, son el fundamento del modelamiento y la simulación de sistemas, fenómenos y comportamientos complejos. Con ellas, las lógicas no-clásicas atraviesan transversalmente tanto el estudio de los sistemas dinámicos no-lineales como el propio modelamiento y simulación.

Algunas de las lógicas no-clásicas –igualmente conocidas como lógicas filosóficas– son: la lógica difusa, la lógica de la relevancia, la lógica paraconsistente, la lógica libre, la lógica epistémica, la lógica temporal, la lógica cuántica, la lógica intuicionista y la lógica de fábrica (o fabricación). Desde el punto de vista computacional, lo más significativo es el reconocimiento de que la única lógica no-clásica que ha logrado ser incorporada informacional, algorítmica y computacionalmente ha sido la lógica difusa; esto explica su importancia y ubicuidad en la casi totalidad de las nuevas tecnologías. El trabajo de incorporación computacional de las demás lógicas no-clásicas permanece hasta ahora como una tarea abierta sobre la cual, sin embargo, existen notables y vertiginosos avances recientes.

El trabajo en ciencias de la complejidad consiste, de cara a fenómenos lineales, deterministas y periódicos, en el estudio acerca de la posibilidad de transformar la linealidad en no-linealidad. Esto se dice fácilmente, pero es extremadamente difícil y de hecho en esto radica, exactamente, todo el trabajo de los complejólogos. Sólo que es fundamental atender al reconocimiento explícito de que, cuando se logra convertir o transformar el fenómeno de estudio de lineal a no-lineal, el fenómeno mismo sufre una transformación

⁵ Las ciencias de la complejidad están conformadas por la termodinámica del no-equilibrio, el caos, las catástrofes, la geometría de fractales, la vida artificial, la ciencia de redes y las lógicas no-clásicas (Maldonado, 2005). Desde luego, este es el panorama grueso, pues, a su vez, estas ciencias están constituidas por una pluralidad de modelos, metodologías, conceptos, problemas y disciplinas. No es este el lugar indicado para hacer una taxonomía de las ciencias de la complejidad y, por lo demás, al respecto existe una bibliografía amplia relativamente coincidente entre sí.

radical. En numerosos casos esta transformación acarrea un cambio de paradigma, un giro lingüístico o una novedad semántica, en fin, una modificación del aparato herramental o conceptual con el que habitualmente se trabaja(ba).

Sin que sea una regla, el modo más usual para transformar un fenómeno o sistema lineal en uno no-lineal es a través del siguiente decurso: se trabaja en la transición de un sistema determinista a un sistema estocástico y, posteriormente, de un sistema estocástico a uno determinista no-lineal (Anderson, Arrow y Pines, 1988).

Sin embargo, es preciso advertir explícitamente que no siempre y no todo sistema lineal puede ser transformado en un fenómeno no-lineal. Lo que sí es claro es que el trabajo en complejidad implica una distancia con respecto a distribuciones normales: ley de grandes números, campanas de Gauss, descripciones estadísticas, incluso matriciales.

Ahora bien, de manera complementaria al trabajo de estudio acerca de la posibilidad de transformar un sistema lineal y determinista en uno no-lineal, los complejólogos estudian, mediante la ayuda de la simulación y el modelamiento, la forma en que los sistemas caracterizados por emergencias, sinergias, autoorganización, turbulencias y fluctuaciones, por ejemplo, se comportan de manera compleja, es decir, impredecible, aperiódica, y qué consecuencias se siguen de ello.

En efecto, se puede decir que el espíritu de las ciencias de la complejidad no se reduce sencillamente a transformar, cuando es posible, un fenómeno lineal en uno no-lineal, así como tampoco simplemente a encontrar –acaso en haber convertido un sistema determinista en uno no-lineal– un comportamiento complejo; esto es, impredecible, que exhibe las propiedades y características suficientemente reconocidas de los sistemas complejos (autoorganización, interacciones entre partes elementales que dan como resultado un todo que es más que la sumatoria de las partes, emergencias y otras). Antes bien, la complejidad es ante todo un tipo de ciencia de posibilidades y es ciencia para tiempos de crisis y de fenómenos que están en crisis, así:

- En tanto que la crisis existe y/o es inminente;
- O bien porque la crisis no tiene (aún) lugar pero podría llegar a suceder;
- E incluso aunque la crisis sea probable o posible y jamás llegue a tener lugar.

Las consecuencias éticas, políticas, científicas y filosóficas de esta triple consideración no escapan a una mirada sensible.

De esta suerte, las ciencias de la complejidad avanzan por un dúplice camino, por así decirlo. De una parte, análogamente al espíritu de la ciencia en general, avanzan en la resolución de problemas, o mejor, de conjuntos de problemas, de espacios de soluciones. Es en este contexto que los problemas de optimización y, en general, la heurística y las metaheurísticas desempeñan un papel fundamental en complejidad. De otro lado, al mismo tiempo, dado el carácter radical del trabajo en complejidad, el trabajo de los complejólogos consiste en la formulación o concepción de nuevos problemas, para la cual la combinación de intuiciones (= pompas de intuición), los experimentos mentales (= fantasía, imaginación) y el recurso del modelamiento y la simulación resultan invaluable, es decir, fundamentales, estratégicos si se prefiere.

En efecto, es una especificidad de las ciencias de la complejidad que no únicamente de forma prioritaria resuelven problemas, sino, además y fundamentalmente, exploran espacios, abren horizontes y anticipan procesos, fenómenos y dinámicas. Es exactamente en este sentido que el uso del modelamiento y la simulación se revela esencial, ya que justamente las ciencias de la complejidad tratan antes que con realidades –en el sentido empírico de la palabra– con posibilidades. *Las ciencias de la complejidad son ciencias de posibilidades* y la realidad es, en rigor, tan solo un modo de la posibilidad (Maldonado, 2009).

De este modo, el modelamiento y la simulación no simplemente cumplen un papel representativo o representacional, sino heurístico en el sentido al mismo tiempo más fuerte y preciso del término. En otras palabras, la heurística, en general, y las metaheurísticas, en especial, exploran modelos, espacios de soluciones, dimensiones y cruces entre ellas. En fin, son el estudio de comportamientos caracterizados por inestabilidad, incertidumbre, adaptación, no-linealidad.

¿Qué es un modelo?

La primera caracterización de un modelo suele ser descriptiva, por ejemplo, existen modelos físicos, matemáticos, computacionales, económicos, epidemiológicos, políticos y administrativos. Cada investigador en estas áreas puede identificar racional o intuitivamente el tema. Sin embargo, en términos conceptuales, es bastante más afortunado recordar que un modelo –teórico o conceptual– es sencillamente una *interpretación* del mundo o de una región del mundo. Este modelo puede implicar o basarse en elementos matemáticos, conceptuales u otros, pero consiste en una interpretación sólida, con frecuencia sometida a pruebas, verificaciones, falsaciones o refutaciones, o bien, igualmente, en una hipótesis consistente.

El tema fuerte en el estudio de los modelos tiene tres frentes:

- a) Estudiar cómo surgen los modelos;
- b) Establecer cómo se defienden y se mantienen;
- c) Comprender por qué se echan abajo, mueren y se eliminan unos modelos por otros (Maldonado, 2010).

Sin embargo, la contribución del modelamiento y la simulación radica en la puesta a prueba de modelos –reales o potenciales– gracias precisamente al desarrollo de programas centrados en problemas, comportamientos y sistemas que responden a leyes de potencia, autoorganización, sincronización y a redes libres de escala, en correspondencia precisamente con las ciencias de la complejidad.

Así, mientras que la ciencia clásica formula modelos que son, en últimas, esencialmente esquemas fijos, representaciones rígidas de sistemas o fenómenos determinados, las ciencias de la complejidad elaboran *modelos dinámicos* que son el resultado justamente de la simulación y el modelamiento. Esta idea puede y debe ser ilustrada en los siguientes términos:

La historia de la humanidad es el tránsito que se inicia con los dibujos y las pinturas, continúa luego con la fotografía y llega finalmente a la película y el video. De esta forma, hemos hecho el tránsito de una concepción y representación estática del universo, el mundo y la sociedad a una comprensión y explicación dinámica de los mismos. Retrospectivamente, desde luego cabe

incorporar fotografías y fotogramas, dibujos, bocetos y pinturas del mundo, pero todo ello constituye instantáneas de una visión dinámica. Tal es exactamente la especificidad de la simulación y el modelamiento respecto a los modelos. Esta observación se extiende, en toda la extensión de la palabra, a los campos sintácticos y semánticos con los que explicamos y comprendemos la naturaleza en general.

En cualquier caso, el modelamiento y la simulación trabajan, esencialmente, en tres dominios:

- Modelamiento y simulación de comportamientos, fenómenos y sistemas
- Modelamiento y simulación de modelos
- Modelamiento y simulación de problemas

En el primer caso, se trata de estudiar, con la ayuda del computador, aquellos fenómenos, sistemas y comportamientos que responden a las teorías, los conceptos, enfoques, modelos y métodos constitutivos de las ciencias de la complejidad. En otras palabras, la condición *sine qua non* del modelamiento y la simulación de sistemas complejos estriba en el estudio mismo de temas como adaptación y evolución, autoorganización y redes booleanas, vida artificial y redes complejas, problemas de optimización y catástrofes, fractales y criticalidad autoorganizada, lógicas no clásicas y comportamientos imprevisibles y aperiódicos, control local y ausencia de control central rígido, emergencias, flexibilidad y robustez, para mencionar algunos.

En el segundo dominio, la contribución específica de la simulación y el modelamiento se refiere a la puesta dinámica de los modelos clásicos, de esa forma se hace en este punto la conexión con la posibilidad de transformar sistemas lineales en no-lineales. Pero, al mismo tiempo, se trata igualmente de explorar modelos dinámicos que aún no han sido avizorados por la comunidad científica y académica, siempre en correspondencia con el hecho de si se trata de una finalidad práctica empírica o de comprensión y explicación, como se mencionó al comienzo.

Finalmente, el modelamiento y la simulación de problemas hace referencia a la toma de distancia con respecto a esquemas teóricos y conceptuales de eficacia, eficiencia, maximización, *second best* y otros semejantes, para enfocarse en problemas de optimización que se ilustran, por ejemplo, en el

estudio de temas conspicuos como el Problema del Agente Viajero, el estudio de la imposibilidad (Barrow, 1998), las paradojas, las inconsistencias, las contradicciones no-triviales, el estudio de la adaptación y los posibles adyacentes, criticalidad, subcriticalidad y supracriticalidad, en fin, en las relaciones reales o posibles entre problemas P y $N-P$. Con ello, el campo magnífico de la simulación y el modelamiento de sistemas de complejidad creciente es el de la complejidad algorítmica y la complejidad computacional de un sistema o fenómeno y las relaciones entre ellas (Chaitin, 2007).

Computación bio-inspirada e ingeniería de sistemas complejos

El tipo de computación que demanda el estudio de sistemas de complejidad creciente se expresa, desarrolla y es conocido como *computación bio-inspirada*, *computación motivada biológicamente* o *computación con metáforas biológicas*, tres formas de referirse a un mismo conjunto de intereses o problemas (De Castro y Von Zuben, 2005). Se trata esencialmente de todos aquellos programas desarrollados con base en el estudio de los sistemas vivos y de las dinámicas de los sistemas vivos. Así, la metáfora compleja proviene y se nutre de la biología, en el sentido más amplio y fuerte de la palabra, y de la ecología. Hablamos entonces, por ejemplo, de redes neuronales, autómatas celulares, computación inmune o inmunológica, computación evolutiva, computación con ADN, computación orgánica y de dinámicas de homeostasis, de homeorhesis y de metabolización. Estas tendencias constituyen verdadera investigación de punta y se condensan en lo que se ha denominado el *nuevo ABC de la computación*⁶: *adaptación, bio-inspiración y complejidad*.

Es necesario, sin embargo, hacer algunas precisiones. En primer lugar, las tendencias contemporáneas en computación orientadas al estudio de sistemas complejos no sólo trabajan con sistemas biológicos y se han desplazado hacia el pensamiento en términos de los mismos, sino que, de forma más amplia y genérica, lo han hecho hacia el estudio de sistemas naturales en general. En este sentido, fue introducido, a finales de los años noventa, el concepto de *computación natural* para referirse al estudio de los procesos de cómputo en la naturaleza (captura, almacenamiento, procesamiento y transmisión de información) y a su aplicación en diversos campos del conocimiento. La computación bio-inspirada resulta ser una categoría (la más amplia e importante) de la computación natural. Son tres las ramas principales que componen la investigación en computación natural (De Castro, 2007):

- *El modelamiento, la simulación y la emulación de sistemas, dinámicas y estructuras naturales a través de medios computacionales.* Más precisamente, consiste en la síntesis y el estudio (computacio-

nal) de tales estructuras, dinámicas y sistemas. La finalidad de este campo es dúplice: de un lado, se orienta a la comprensión y explicación de problemas y sistemas naturales que han sido pobremente abordados por la ciencia tradicional, así como a la formulación y el estudio de problemas obliterados o nunca antes abordados. Por otra parte, consiste en la posibilidad de juzgar, probar y validar, mediante simulaciones computacionales, hipótesis, conjeturas y teorías sobre los sistemas naturales. Los modelos así construidos sirven de insumo para el siguiente componente.

- *El desarrollo de técnicas inspiradas por la naturaleza para la resolución de problemas en ciencia, ingeniería y negocios.* Consiste en dos pasos: a) la formulación de modelos teóricos que puedan, ulteriormente, ser implementados en un ambiente computacional con el fin de reproducir las estructuras o dinámicas del fenómeno natural estudiado y b) la utilización de tales modelos para construir algoritmos capaces de resolver problemas complejos, sean naturales o no. La motivación es, claramente, la de proveer técnicas y algoritmos alternativos para solucionar problemas que no pueden ser resueltos (satisfactoriamente) por algoritmos y técnicas tradicionales como las que suministra la investigación de operaciones o la inteligencia artificial clásica. Es aquí donde el trabajo con metaheurísticas se hace posible, necesario y más fructífero (más adelante volveremos sobre este punto).
- *El uso de materiales naturales para llevar a cabo procesos de computo.* Se trata de la búsqueda de nuevas técnicas, metodologías y máquinas, basadas en materiales naturales (por ejemplo, moléculas, células u organismos), para el tratamiento y la resolución de problemas no computables⁷. Técnicamente, estos trabajos se condensan en un programa de investigación, conocido como *hipercomputación*, abierto por Alan Turing en su tesis doctoral en 1938.

⁷ Un problema no computable es aquel que no encuentra solución en una máquina universal de Turing o, lo que es equivalente, en un computador basado en la arquitectura Von Neumann (la cual se centra en un procesador muy complejo capaz de resolver tareas complejas de forma secuencial –una a la vez–). En términos coloquiales, se tratan problemas que no se pueden solucionar con los recursos que provee un computador convencional –portátil o de escritorio– con un procesador único.

Cada una de estas ramas se compone, a su vez, de diversas líneas de investigación, teorías, conceptos y metodologías (tabla 1). Sin embargo, esta distinción está lejos de ser rígida y de establecer fronteras tajantes entre una y otra. De un lado, el modelamiento y la simulación de un fenómeno natural (p. ej. selección natural) suele desembocar en estrategias para resolver problemas (p. ej. programación evolutiva) y, ulteriormente, en nuevas formas potenciales para llevar a cabo tareas de computo (p. ej. computación con ADN). Desde otro punto de vista, el abordaje de problemas complejos implica, cada vez más, de cara a su resolución, la integración, la mezcla o el cruce de técnicas de modelamiento y simulación, heurísticas y metaheurísticas de optimización, adaptación y/o aprendizaje, y potentes arquitecturas (paralelas) que soporten, en cada caso, el problema a resolver. El eje se traslada, pues, de un conjunto de técnicas y algoritmos hacia el trabajo con sistemas integrados. Más precisamente, el trabajo con *sistemas híbridos*.

Tabla 1. Principales técnicas, algoritmos, teorías y líneas de investigación de la computación natural. Buena parte de los campos presentados (excepto las heurísticas y las metaheurísticas basadas en soluciones únicas) pertenece al trabajo con computación bio-inspirada

Modelamiento y simulación (comprensión y explicación de fenómenos)	<ul style="list-style-type: none"> • Autómatas celulares • Geometría fractal • Modelamiento y simulación basados en agentes • Vida artificial (como modelamiento de fenómenos naturales) • Sistemas de Lindenmayer • Químicas artificiales (p.ej. redes autocatalíticas) 	
Resolución de problemas mediante heurísticas y metaheurísticas (control, optimización, búsqueda, reconocimiento de patrones, aprendizaje, adaptación, evolución y otros)	Heurísticas	<ul style="list-style-type: none"> • Hill-climbing • Búsqueda del mejor primero • Búsqueda sistemática desinformada
	Metaheurísticas basadas en soluciones únicas	<ul style="list-style-type: none"> • Análisis de paisaje adaptativo • Búsqueda local • Búsqueda local iterada • Búsqueda tabú • Temple –o recocido– simulado • Búsqueda variable de vecindad • Búsqueda local guiada • Sistemas difusos

Continúa

Resolución de problemas mediante heurísticas y metaheurísticas (control, optimización, búsqueda, reconocimiento de patrones, aprendizaje, adaptación, evolución y otros)	Búsqueda por dispersión	
	Redes neuronales artificiales	
	Computación evolutiva (algoritmos evolutivos)	<ul style="list-style-type: none"> • Algoritmos genéticos • Programación genética • Programación evolutiva • Algoritmos meméticos • Estrategias evolutivas • Sistemas clasificadores de conocimiento • Evolución diferencial • Algoritmos coevolutivos • Algoritmos culturales
	Inteligencia de enjambres (o colectiva)	<ul style="list-style-type: none"> • Optimización por colonias de hormigas • Optimización por enjambres de partículas • Optimización por forrajeo de enjambres de bacterias • Algoritmo de colmenas de abejas artificiales • Búsqueda por difusión estocástica
	Computación inmune	<ul style="list-style-type: none"> • Algoritmos de selección negativa • Teoría de redes inmunes • Algoritmo de selección clonal • DT
Hiperheurísticas	<ul style="list-style-type: none"> • Basadas en la elección aleatoria de heurísticas de bajo nivel • Codiciosas y hambrientas • Basadas en metaheurísticas • Basadas en mecanismos de aprendizaje para la gestión de heurísticas de bajo nivel 	
Nuevos paradigmas computacionales (hipercomputación, A. Turing)	Computación celular (Sipper)	
	Computación orgánica	
	Computación molecular	Computación con ADN (Adleman)
		Computación con membranas (Păun)
Computación cuántica		

En condiciones similares a las de la computación natural, otros paradigmas computacionales han surgido a partir de, basándose en, o tomando prestados elementos de, la computación bio-inspirada. Los dos casos más conspicuos son la *computación suave*, a partir de los trabajos en lógica difusa de L. Zadeh, y el tránsito de la inteligencia artificial clásica a la *nueva inteligencia artificial*, también conocida como *inteligencia computacional* o *inteligencia artificial*

bio-inspirada. En ambos casos, lo que se encuentra en la base es, justamente, la idea de la “hibridación” de modelos y técnicas para resolver problemas de complejidad creciente relacionados con optimización global, toma de decisiones, control descentralizado y difuso, clasificación, reconocimiento de patrones, seguridad computacional, imprecisión, búsqueda, aprendizaje, adaptación, evolución y autoorganización e incertidumbre, entre otros.

La computación suave en sus orígenes se caracterizó por una triada de técnicas que buscaba resolver tres de los problemas citados en el párrafo anterior: lógica difusa (imprecisión), redes neuronales artificiales (aprendizaje) y razonamiento probabilístico (incertidumbre). Más adelante, se sumaron a la computación suave otros campos como las redes de creencias, la teoría del aprendizaje, los algoritmos genéticos y la teoría del caos. Por su parte, los paradigmas que conforman la inteligencia computacional, aunque las opiniones suelen diferir entre autores, son las redes neuronales artificiales, los sistemas inmunes artificiales, la computación evolutiva, la inteligencia de enjambres y los sistemas difusos. Con frecuencia, estas técnicas se suelen integrar con técnicas probabilísticas. En los últimos años, la computación suave ha convergido hacia la inteligencia computacional y esta última, como se aprecia, hacia los sistemas bio-inspirados. El esquema de la figura 2 ilustra las posibilidades de construir sistemas híbridos en computación suave e inteligencia computacional.

De cara al futuro de la computación bio-inspirada en general y de otros campos, como la computación natural, la inteligencia computacional (incluida, por ejemplo, la inteligencia de negocios) o la computación suave en particular, no sobra insistir en el papel de los sistemas híbridos (sean clásicos o contemporáneos, de optimización o simulación) en la resolución de problemas cada vez más complejos, o también en el tránsito de los problemas P a los problemas $N-P$.

En segundo lugar, las metáforas provenientes de la biología no se agotan en, ni se reducen a, la computación bio-inspirada. Podemos fácilmente distinguir entre *sistemas bio-inspirados* (Floreano y Mattiussi, 2008 y Negoita e Hintea, 2009), *computación bio-inspirada* (Komosinski y Adamatzky, 2009) y *optimización bio-inspirada* (Lewis, Mostaghim y Randal, 2009). Véase la figura 3.

En términos generales, la mejor expresión de los sistemas bio-inspirados es la vida artificial fundada por Ch. Langton en 1987 a expensas del Instituto Santa Fe y del Centro de Estudios No Lineales del Laboratorio Nacional de Los Álamos. La vida artificial puede ser comprendida fácilmente desde dos puntos de vista complementarios: como el enfoque sintético de la biología, o como la ciencia de los artefactos que se comportan como la vida. Dicho de otro modo, la vida artificial es el estudio de la vida desde un enfoque productivo antes que histórico (F. Varela). Tal enfoque productivo se refiere a la idea según la cual la mejor manera de comprender (y explicar) la complejidad de un fenómeno, sistema o comportamiento dado consiste en crear (=construir), literalmente, dicho comportamiento, sistema o fenómeno. Es justo en este punto donde el modelamiento y la simulación juegan un papel central.

Además, el enfoque productivo de la vida artificial tiene implicaciones serias y profundas para la ingeniería al permitirle construir sistemas y solucionadores de problemas capaces de evolucionar, adaptarse y autoorganizarse, entre muchas otras cosas. Es aquí donde las metaheurísticas y la hipercomputación hacen su aparición.

Pues bien, gracias a la vida artificial, se sentaron y consolidaron las bases de las técnicas contemporáneas de modelamiento, simulación y resolución de problemas, las cuales se pueden resumir en los siguientes elementos:

- Síntesis antes que análisis.
- Modelamiento de abajo hacia arriba (bottom-up) antes que de arriba hacia abajo (top-down).
- Control local antes que global.
- Especificaciones simples antes que complejas.
- Simulación de poblaciones antes que de individuos.
- Dinámica (no-lineal) antes que composición o estructura.
- Procesamiento paralelo antes que seriado.
- Comportamiento emergente antes que pre-especificado (o causal).
- Posibilidades antes que facticidades.

Hacia abajo, de otra parte, la computación bio-inspirada circunscribe el estudio de técnicas para la optimización de problemas complejos. Este campo, aún en crecimiento, se conoce como optimización bio-inspirada. Los problemas complejos de optimización requieren ser modelados y posteriormente

simulados para explorar sus vastos espacios de soluciones. Por tanto, podemos hablar en términos de *modelos de optimización* y de *optimización simulada*.

La historia de la optimización puede rastrearse en tres momentos principales: desde la investigación de operaciones, desde la inteligencia artificial y desde la vida artificial. La investigación de operaciones se consolidó como una rama de las matemáticas a finales de los años treinta y se mantuvo vigente hasta finales de los años ochenta. A ella se deben buena parte de los métodos clásicos de optimización, entre los que se encuentran las técnicas de programación matemática (continua, entera, mixta), los modelos de satisfacción de restricciones, la teoría de colas y los inicios de la optimización combinatoria.

La inteligencia artificial, por su parte, retomó y amplió los problemas de optimización combinatoria, inició el trabajo con problemas de optimización dinámica y multi-objetivo e inauguró el estudio de métodos no analíticos (heurísticos) de optimización como las redes neuronales, la búsqueda tabú o el temple simulado. Las heurísticas y las metaheurísticas basadas en soluciones únicas comenzaron a tomar fuerza en la resolución de problemas *N-P*. El auge de los modelos de la inteligencia artificial (clásica) se mantuvo hasta finales de los años noventa.

La vida artificial es el plano más reciente para la resolución de los problemas complejos de optimización y se concreta en la construcción de metaheurísticas (y no simplemente de heurísticas) y, más recientemente, en el trabajo con hiperheurísticas. Una metaheurística es una metodología (o un marco algorítmico) de alto nivel que posibilita el diseño de heurísticas subyacentes para resolver problemas complejos de optimización, mientras que las hiperheurísticas apuntan a la elección automática de métodos heurísticos o metaheurísticos que resuelvan, cada vez, uno de los posibles puntos de decisión o de solución que caracterizan a los problemas complejos (Cotta, Sevaux y Sörensen, 2008). Las hiperheurísticas utilizan información limitada del problema dado y no requieren un conocimiento explícito de las heurísticas y metaheurísticas disponibles para su resolución.

A diferencia de los métodos analíticos y exactos tradicionales, las heurísticas y metaheurísticas no garantizan, en la mayoría de las ocasiones, soluciones óptimas o cercanas a un óptimo, supuesto el número astronómico de soluciones posibles característico de los problemas de complejidad creciente. Mejor aún: *el objetivo principal de las heurísticas y metaheurísticas es producir soluciones de calidad aceptable en un tiempo razonable*. Por tanto, en

el ámbito de la optimización bio-inspirada, los temas que se revelan como centrales son la optimización dinámica (problemas que cambian su estructura y/o los datos del problema, mientras la metaheurística intenta resolverlos), la optimización multi-criterio, la optimización multi-objetivo evolutiva y la optimización robusta, principalmente.

Finalmente, y con base en los sistemas, la computación y la optimización bio-inspiradas, a partir del año 2006, ha emergido un nuevo y radicalmente distinto tipo de ingeniería llamado (en español) *ingeniería de sistemas complejos* (ISC), cabe anotar que su nombre en inglés es bastante más afortunado: *complex engineered systems* (CES). La diferencia (semántica y, sin embargo, fundamental) es que el término en español haría pensar en una nueva clase de ingeniería, al lado, por ejemplo, de la ingeniería química, la ingeniería de alimentos, la ingeniería administrativa o de transportes, cuando no como una clase más, distinta, al lado de la ingeniería civil, de sistemas, o militar, por ejemplo. En contraste, en inglés el foco no es la ingeniería, sino el tema, el problema mismo de que se trata, a saber: cómo “ingenierar” los sistemas complejos. En otras palabras, en inglés el centro lo ocupa el problema o el sistema de estudio, no la mirada que ve dicho sistema o problema (= la ingeniería).

Conclusiones

La emergencia de un nuevo tipo de ciencia, fundada ya no exclusivamente en la inducción o en la deducción, implica con total seguridad no simplemente el surgimiento de nuevos paradigmas, nuevos lenguajes, formas nuevas de organización del conocimiento y de organización, en general, de la sociedad alrededor del conocimiento. También implica sobre todo y de manera radical un nuevo tipo de racionalidad. Gracias al descubrimiento de los sistemas dinámicos, esto es, de los sistemas, fenómenos y comportamientos de complejidad creciente, el mundo en general, la naturaleza y nosotros mismos jamás volveremos a ser los mismos. Pues bien, en todo este proceso, el computador desempeña un papel protagónico.

Numerosas han sido (y presumiblemente lo serán aún) las discusiones entre matemáticos y estudiosos de diversas ciencias acerca del trabajo puro o aplicado, según si se emplea o no y en qué forma el computador. Pero, asimismo, y de manera aún más conspicua, los temas de base que emergen irremisiblemente tienen que ver, en general, con los nuevos problemas de la computación.

¿Qué es computar? Básicamente estriba en lo que podemos pensar, lo que podemos saber o conocer, lo que podemos decir y los problemas que podemos resolver. Lo verdaderamente maravilloso de *los nuevos paradigmas computacionales* (Cooper, Löwe y Sorbi, 2008) consiste exactamente en esto: nunca como ahora habían sido tan magníficas nuestras oportunidades de desarrollo (humano, espiritual, cognitivo, etc.) y, al mismo tiempo, nunca habían sido tan grandes los desafíos a los que nos enfrentamos. Con seguridad el éxito de superación de estos desafíos radica en la comprensión acerca de la complejidad del mundo y de la naturaleza. Con ella, entonces, el tema maravilloso es el del modelamiento y la simulación de los procesos, las dinámicas y los fenómenos que implican por igual a la vida: a la vida conocida tanto como a la vida por conocer, a la vida tal y como la conocemos, tanto como a la vida tal-y-como-podría-ser (*life-as-it-could-be*). Trabajamos, necesaria e inevitablemente, con la dimensión de lo posible.

Glosario

Complejidad algorítmica: extensión del programa más breve para la solución de un problema o de un conjunto o una serie de problemas.

Complejidad computacional: condiciones (temporales, de recursos, herramientas, conceptuales y otras) de resolución de un problema o de espacios de soluciones de problemas.

Heurística: reglas de oro (*rules of thumb*), conjeturas (*educated guesses*), juicios intuitivos o sentido común orientados a la solución de problema(s) particular(es) o local(es).

Hiperheurística: tipo de (meta) heurística de alto nivel que elige (meta) heurísticas de bajo nivel en cada punto de decisión de un problema dado.

Metaheurística: conjunto de heurísticas que resuelven problemas en términos globales o de población. Se subdivide en híbridas, paralelas y otras.

Modelamiento: programación computacional de un sistema, un problema o un modelo con vista a aplicaciones prácticas.

Modelo: interpretación coherente o consistente, usualmente cerrada y eventualmente autorreferencial, del mundo, de la naturaleza o la sociedad o de una parte de ellos.

Problemas N-P: problemas que no admiten para su comprensión y solución un tiempo fragmentado. Ejemplos de tiempo no-polinomial son el tiempo exponencial, o el cairológico (*kairós*).

Problemas P: problemas que se definen en función de un tiempo polinomial, es decir, analítico y de fragmentación.

Simulación: aplicación o desarrollo de un programa con fines de investigación básica (*in silico* o *in vitro*) que, ulteriormente, puede llegar a tener implicaciones o aplicaciones prácticas.

Sistema complejo: se dice que es de complejidad creciente todo fenómeno, sistema o comportamiento que implica rasgos tales como no-linealidad, adaptación, emergencias, autoorganización, aperiodicidad e imprevisibilidad, entre otros.

Referencias bibliográficas

- ANDERSON, P. W., ARROW, K. J. y PINES, D. (eds.), *The Economy as an Evolving Complex System*, Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity, Vol. V, Westview Press, 1988.
- ARORA, S. y BARAK B., *Computational Complexity. A Modern Approach*, Cambridge, Cambridge University Press, 2009.
- ARTHUR, W. B., DURLAUF, S. N. y LANE, D. A. (eds.), *The Economy as an Evolving Complex System II*, Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity, Vol. XXVII, Westview Press, 1997.
- AXELROD, R., *The Complexity of Cooperation. Agent-Based Models of Competition and Collaboration*, Princeton, NJ, Princeton University Press, 1997.
- BARROW, J. D., *Impossibility. The Limits of Science and the Science of Limits*. New York: Oxford University Press, 1998.
- BLUME, L. E. y DURLAUF, S. N., *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, 2006.
- CHAITIN, G., *Metamaths. The Quest for Omega*, London, Atlantic Books, 2007.
- COOPER, S. B., LÖWE, B. y SORBI, A. (eds.), *New Computational Paradigms. Changing Conceptions of What Is Computable*, New York, Springer-Verlag, 2008.
- COTTA, C., SEVAUX, M. y SÖRENSEN, K. (eds.), *Adaptive and Multilevel Metaheuristics*, Berlin, Springer-Verlag, 2008.
- COWAN, G., PINES, D. y MELTZER, D., *Complexity: Metaphors, Models, and Reality*, Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity, Westview Press, 1999.
- DE CASTRO, L. N., *Fundamentals of Natural Computing: An Overview*, Physics of Life (4), 2007.
- DE CASTRO, L. N. y VON ZUBEN, F., *Recent Developments in Biologically Inspired Computing*, Hershey, PA, Idea Group Publishing, 2005.
- ENGELBRECHT, A., *Computational Intelligence: an Introduction*, 2 ed., Chichester, John Wiley & Sons, 2007.
- FLOREANO, D. y MATTIUSSI, C., *Bio-Inspired Artificial Intelligence: Theories, Methods, and Technologies*, Cambridge, MA, MIT Press, 2008.

- GINTIS, H., *Game Theory Evolving. A Problem-Centered Introduction to Modeling Strategic Interaction*, Princeton, NJ, Princeton University Press, 2000.
- GOLDREICH, O., *Computational Complexity. A Conceptual Approach*, Cambridge, Cambridge University Press, 2008.
- GÓMEZ CRUZ, N. y VILLAMIL, J., “Ingeniería de Sistemas Complejos”, en C. E. Maldonado, *Complejidad: revolución científica y teoría*, Bogotá, Ed. Universidad del Rosario, 2009.
- KOMOSINSKI, M. y ADAMATZKY, A., *Artificial Life Models in Software*, 2 ed., London, Springer-Verlag, 2009.
- LEWIS, A., MOSTAGHIM, S. y RANDAL, M. (eds.), *Biologically-Inspired Optimisation Methods: Parallel, Systems and Applications*, Berlin, Springer-Verlag, 2009.
- MACAL, C., “Agent Based Modeling and Artificial Life”, en R. Meyers (ed.), *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*, New York, Springer-Verlag, 2009.
- MALDONADO, C. E., “Ciencias de la complejidad: cambios súbitos”, en *Odeón. Observatorio de Economía y Operaciones Numéricas*, 2005.
- MALDONADO, C. E., “Ingeniería de sistemas complejos. Retos y oportunidades”, en P. Padilla y L. Pineda (eds.), *El futuro de la educación en ingeniería y el management of engineering: una perspectiva sistémica*, Ed. ENIM-Universidad del Rosario, (Ciudad), 2010.
- MALDONADO, C. E., “Ciencias de la complejidad y desarrollo tecnológico”, en *Revista Ignis*, No. 4, 2009.
- MALDONADO, C. E. y GÓMEZ CRUZ, N., “Facing N-P Problems Via Artificial Life: A Philosophical Appraisal”, en *Advances in Artificial Life: 10th European Conference on Artificial Life, ECAL 2009*, Berlin, Springer-Verlag, 2010.
- NEGOITA, M. e HINTEA, S., *Bio-Inspired Technologies for the Hardware of Adaptive Systems: Real-World Implementations and Applications*, Berlin, Springer-Verlag, 2009.
- PAGELS, H., *Los sueños de la razón. El ordenador y los nuevos horizontes de las ciencias de la complejidad*, Barcelona, Gedisa, 1991.
- RÍOS INSÚA, D., RÍOS INSÚA, S. JIMÉNEZ, J. M. y JIMÉNEZ MARTÍN, A., *Simulación. Métodos y aplicaciones*, México D.F., México, Alfaomega, 2ª edición, 2009.
- TALBI, E. G., *Metaheuristics: From Design to Implementation*, CIUDAD, John Wiley & Sons, 2009.



Universidad del Rosario
Facultad de Administración

