

Modelos basados en agentes para la simulación de Sistemas Complejos Sociales

Arezky H. Rodríguez

Academia de Matemáticas, Universidad Autónoma de la Ciudad de México (UACM) 03020, Ciudad de México.

1. Introducción: una aproximación a los Sistemas Complejos.

El término “Sistemas Complejos” se refiere tanto a una categoría de clasificación de sistemas de estudio como a una metodología de investigación de carácter interdisciplinaria.

Los Sistemas Complejos aún no cuentan con una definición clara y precisa. Diferentes autores utilizan diferentes aproximaciones para realizar esta clasificación. Este hecho está en consonancia con la propia identidad “compleja” de estos sistemas. Diferentes investigadores, desde sus propios dominios del saber, tienen formas de decir y aportar a la clasificación de estos sistemas, de forma que los Sistemas Complejos se colocan en el centro de un diálogo de saberes donde cada especialista aporta, desde su postura científica, una unidad de conocimiento sobre estos objetos de estudio. De esta manera, estos sistemas demandan un abordaje multidisciplinario para su comprensión y estudio.

Pero, ¿cómo definiremos en este trabajo los Sistemas Complejos? Primeramente vamos a realizar una distinción entre los sistemas “complicados” y los Sistemas Complejos.

Es posible aceptar, sin mucha discusión, que estamos rodeados de sistemas “complicados”. Estos están compuestos de multitud de elementos constituyentes que muy frecuentemente hacen al sistema difícil de estudiar y, en última medida, difícil de comprender. Sin embargo, es necesario hacer una distinción entre los sistemas “complicados” y los “complejos”. En los sistemas complicados, los diferentes elementos que componen al sistema mantienen un alto grado de independencia, tal que al remover uno de ellos se reduce proporcionalmente el grado de complicación del sistema, pero esto no altera de forma fundamental el comportamiento del sistema más allá de lo que resulte de extraer la pieza. Podemos decir entonces que el grado de complicación en estos sistemas es directamente proporcional a la estructura del sistema. Variaciones del tamaño de la estructura de los mismos producen variaciones proporcionales de la propiedad de “complicación”.

Sin embargo, la “complejidad” de los Sistemas Complejos es una propiedad más elaborada. Por un lado, un Sistema Complejo es *Robusto* respecto a su estructura, es decir, variaciones de la estructura de un Sistema Complejo que pueden resultar de eliminar algún elemento del mismo no producen variaciones cualitativas o cuantitativas importantes en el comportamiento del mismo. Esta propiedad también es conocida como *Resiliencia* de un Sistema Complejo y ha conducido a la enunciación de una de las propiedades que se utilizan para describir a estos sistemas. Esta propiedad es la que dice que los Sistemas Complejos contienen información relevante no sólo en sus elementos constituyentes, sino también en el tipo de interacciones que se establecen

entre los mismos. De esta forma, el peso relativo de la importancia de sus elementos constituyentes no es suficiente para producir cambios importantes en el comportamiento del sistema cuando el elemento es removido.

Sin embargo, por otro lado, si continuamos removiendo elementos del sistema llega un momento crítico en que la interacción e interdependencia entre los elementos restantes es fundamental, tal que al remover uno de estos elementos el comportamiento del sistema cambia en un grado tal que va más allá de la propiedad que tenía el elemento removido y el sistema cambia cualitativamente. En otras palabras, el sistema deja de ser el mismo e incluso se puede decir que el sistema es destruido (Miller, 2007).

De esta forma, podemos decir que en un sistema complicado el grado de complicación del mismo es proporcional a su estructura, pero la *complejidad* de un sistema complejo no lo es, sino que esta no depende inicialmente de la estructura del sistema (zona robusta del sistema) y después la complejidad desaparece porque el sistema es destruido. En otras palabras se puede decir que un sistema complicado es *reducible* a sus partes, mientras que un sistema complejo *no lo es*. Esto a su vez representa un nuevo *paradigma* de estudio en el sentido de Kuhn (1962).

El “reduccionismo” era el paradigma dominante en la ciencia en el siglo pasado. Cuando un científico se enfrentaba al estudio de un sistema, la herramienta tradicional a utilizar consistía en reducir este sistema a sus partes constituyentes, de forma tal que al estudiarlas y comprenderlas, la comprensión del comportamiento de todo el sistema se obtenía a partir de entender el comportamiento de sus partes e integrar el sistema de forma que la suma de la comprensión del comportamiento de sus partes llevaba a la comprensión del comportamiento de todo el sistema. En este paradigma, la metáfora de la ciencia era la de un edificio que se va construyendo sobre bases sólidas (partículas elementales, la célula como unidad de lo biológico, la familia como unidad de la sociedad, etc.) y donde se puede llegar a un conocimiento total.

Sin embargo, al abordar el estudio de un sistema complejo este procedimiento de investigación falla debido a la imposibilidad de reducir el sistema a la mera suma de sus partes sin “destruirlo”. De esta forma, la metáfora científica actual es la de la red o la de un entramado donde todo está interconectado, el estudio de los sistemas se aborda desde un punto de vista holístico, donde para comprender al *todo* se necesita comprender sus partes constituyentes, pero a su vez, para entender estas partes constituyentes se necesita tener una visión de conjunto de todo el sistema. De esta forma son varios los autores que plantean que en los estudios científicos basados en este nuevo paradigma sólo se pretenden hacer descripciones aproximadas de lo dado (Capra, 1989). Igual podemos citar a Edgar Morin: “*La Aspiración a la complejidad lleva en sí misma la aspiración a la completitud, porque sabemos que todo está relacionado y es multidimensional. Sin embargo, también comprendemos que no podremos escapar a la incertidumbre y que no podremos tener un saber total*”.

Habiendo descrito muy brevemente la génesis de los Sistemas Complejos, tratemos de definirlos (acotarlos) mediante una enumeración de sus características principales:

- Los Sistemas Complejos pueden definirse como un “conjunto de elementos en interacción” que están caracterizados por una estructura compuesta por varios niveles.
- Un Sistema Complejo está compuesto por varias partes interconectadas cuyos vínculos contienen información adicional, es decir, como resultado de las interacciones entre sus elementos surgen propiedades nuevas que no pueden explicarse a partir de las propiedades de los elementos aislados. Dichas propiedades se denominan propiedades emergentes.
- El comportamiento del sistema surge a partir de la auto-organización de sus componentes, sin que esta organización esté controlada ni dirigida por ningún ente exterior al sistema. Es decir, cada Sistema Complejo emerge a partir de sus partes y fluctúa hasta quedar fuertemente estabilizado. Esto lo logra a partir de retroalimentaciones positivas y negativas que atenúan cualquier modificación provocada por el medio externo. El sistema reacciona ante agresiones externas que pretendan modificar su estructura.
- Para describir un Sistema Complejo hace falta no solo conocer el funcionamiento de las partes sino conocer cómo se relacionan entre sí. Esta propiedad se resume en la ya conocida frase “El todo es más que la suma de las partes” (concepción holística): la información contenida en el sistema en conjunto es superior a la suma de la información de cada parte analizada individualmente. No podemos entender el todo sin conocer las partes, pero no podemos entender las partes sin conocer al todo.
- Los componentes básicos de estos sistemas (células, hormigas, individuos, poblaciones, empresas,...) perciben su entorno y responden a cambios en él de forma potencialmente diferente. Los agentes de un Sistema Complejo son autónomos.
- Los sistemas complejos son también “adaptativos”: el comportamiento de los componentes básicos del sistema puede evolucionar en el tiempo, dando lugar a una cierta capacidad de respuesta frente a cambios en el entorno. Los agentes de un Sistema Complejo pueden “aprender” de forma diferenciada dando lugar a asimetrías en el sistema.
- Su comportamiento no es predecible a partir de conocer el comportamiento de sus elementos constituyentes. Esta es la propiedad de “No linealidad” de los Sistemas Complejos.

2. Sistemas Complejos Sociales: ¿qué tienen de especial?

En la siguiente Tabla se hace una comparación entre los sistemas sociales humanos, los sistemas sociales de animales y los sistemas físicos, en cuanto a sus elementos constituyentes:

Los sistemas físicos consisten en:	Los sistemas vivos consisten en:	Los sistemas humanos consisten en:
Partículas que: <ul style="list-style-type: none"> • obedecen leyes naturales • interactúan solamente en unas pocas formas diferentes • no tienen “roles” 	Animales que: <ul style="list-style-type: none"> • son parcialmente autónomos • interactúan en varias formas distintas • pueden jugar diferentes roles. 	Actores humanos que: <ul style="list-style-type: none"> • son autónomos • interactúan en formas diferentes numerosas • toman diferentes roles incluso al mismo tiempo
<ul style="list-style-type: none"> • no son consientes de sus interacciones 	<ul style="list-style-type: none"> • son parcialmente consientes de sus interacciones. 	<ul style="list-style-type: none"> • son consientes de sus interacciones.
<ul style="list-style-type: none"> • no se comunican 	<ul style="list-style-type: none"> • se comunican solamente en una forma muy restringida. 	<ul style="list-style-type: none"> • se comunican a través de un lenguaje simbólico

Igualmente, en la siguiente Tabla se hace una comparación entre los mismos sistemas, pero esta vez respecto a las formas de interacción presentes:

Las partículas físicas interactúan con ayuda de:	Los sistemas vivos interactúan con la ayuda de:	Los humanos interactúan con la ayuda de:
<ul style="list-style-type: none"> • un número muy reducido de fuerzas diferentes • campos físicos que pueden cambiar debido al movimiento de las partículas 	<ul style="list-style-type: none"> • sustancias químicas en concentraciones y gradientes • por sonidos (levemente simbólicos, con un léxico muy restringido) 	<ul style="list-style-type: none"> • por sonidos y símbolos gráficos (léxico no restringido que también incluye referencias a objetos inexistentes: unicornios, ángeles)
	<ul style="list-style-type: none"> • por observación de unos a otros y prediciendo los siguientes movimientos 	<ul style="list-style-type: none"> • por observación de unos a otros, prediciendo los siguientes movimientos, induciendo regularidades a partir de lo observado

De esta forma, podemos ver que los sistemas sociales humanos, a diferencia de otros sistemas físicos, consisten en:

- Elementos humanos que pueden interactuar simbólicamente mediante diferentes formas de lenguajes o símbolos.

- Elementos que pueden asumir diferentes roles en diferentes contextos. Son autónomos.
- Elementos que pueden pertenecer a diferentes sistemas (que pueden ser incluso de diferentes tipos) al mismo tiempo. Por ejemplo, un individuo puede ser miembro de una familia donde a la vez es pareja emocional y padre o madre. Igualmente, al mismo tiempo es miembro de una comunidad donde trabaja realizando determinada labor.
- Elementos que son conscientes de sus interacciones y roles y por lo tanto, no están “obligados” a “obedecer” unas “leyes sociales”, es decir, no hay un determinismo “fuerte” como en el caso de las leyes de la física que cumplen, por ejemplo, las partículas elementales.
- Elementos que guardan una “memoria” de sus interacciones pasadas y esta memoria es utilizada para reaccionar en situaciones futuras parecidas.

Podemos decir entonces que los Sistemas Sociales son, muy frecuentemente, complejos. Los agentes sociales, en tanto individuos, se encuentran inmersos en una red de conexiones entre ellos que permiten el flujo de normas, valores, ideas, comportamientos, etc, que sirven de substrato para la aparición de fenómenos emergentes, auto-regulados, de difusión colectiva y co-evolución, como son la propagación de rumores, epidemias, la formación de grupos de opiniones, de grupos especializados, la formación de culturas, aparición y evolución de lenguaje, por mencionar algunos. Los agentes sociales son igualmente capaces de cambiar su comportamiento tomando como datos la interacción con el medio ambiente que les rodea y de la memoria de hechos pasados. Es decir, los agentes sociales son autónomos. Dos agentes con características y valores similares pueden comportarse de forma diferente ante una misma situación, es decir, los agentes sociales están obligados a tomar decisiones continuamente a partir de las interacciones entre ellos y con el medio que les rodea, y a su vez, estas decisiones pueden cambiar el medio y/o la forma en que continuarán interaccionando entre sí. De esta forma los agentes sociales están fuertemente acoplados unos con otros. El resultado de las interacciones en estos sistemas son altamente no lineales debido a los bucles de causalidad y retroalimentación presentes y, por tanto, el sistema es imposible de ser reducido al estudio de cada agente por separado. De esta forma surge la complejidad en estos sistemas.

Todas estas características de los Sistemas Complejos en general, y de los Sistemas Sociales, hacen que el proceso de modelado matemático formal difiera sustancialmente del de otros sistemas más simples. En particular, su naturaleza descentralizada, la presencia de bucles de causalidad y retroalimentación no lineales, y el hecho de contener varias unidades más o menos autónomas, que pueden interaccionar, evolucionar, y adaptar su comportamiento a cambios en el entorno, implica que en la mayoría de los casos es muy difícil –si no imposible- conseguir un modelo que pueda describir el Sistema Complejo adecuadamente y que además sea resoluble matemáticamente.

3. Modelos basados en agentes.

Sin embargo, en las últimas décadas, debido en gran parte al desarrollo de los ordenadores informáticos, han aparecido innovadoras técnicas de modelado de Sistemas Complejos, y en particular, de Sistemas Complejos Sociales, que hacen uso de la nueva tecnología disponible. Una de estas técnicas es la *Simulación Basada en Agentes* (Izquierdo *et al*, 2008). Esta técnica tiene el potencial de complementar modelos no formales (normalmente verbales) de sistemas complejos y modelos matemáticos más abstractos.

A menudo la representación verbal (un primer sistema de símbolos) de sistemas complejos sociales carece del rigor formal necesario para valorar su coherencia lógica y para generalizar a partir de ellos, mientras que los modelos matemáticos (segundo sistema de símbolos) suelen ser menos realistas debido a las fuertes restricciones impuestas por las hipótesis simplificadoras que son necesarias para poder resolverlos. Usando técnicas de modelado computacional, como la simulación basada en agentes, tenemos el potencial de construir modelos que combinan la riqueza descriptiva de los modelos verbales con el rigor formal de los modelos matemáticos más abstractos (Gilbert *et al*, 1995). De esta forma, las simulaciones computacionales constituyen un tercer sistema de símbolos convirtiéndose así en una alternativa a la formalización matemática de las teorías sociales. Aquellas teorías “verbales” que no puedan ser expresadas adecuadamente en el sistema de símbolos dado por la formalidad matemática, puede ser expresada en el tercer sistema de símbolos, y es el ordenador el que permite explorar y analizar las implicaciones formales de este nuevo tipo de modelos computacionales al resolver (ejecutar) el modelo. Es decir, es el ordenador el que ahora deduce las implicaciones lógicas a partir de las premisas del modelo (Izquierdo *et al*, 2008).

Esta nueva herramienta, mas que otra herramienta computacional comercial, está de hecho provocando un gran interés en sus posibilidades de simulación de fenómenos sociales, espaciales y dinámicos, de colectivos humanos, de sociedades de animales y ecosistemas, en nuevas formas que antes no eran posibles. En estos modelos la acción es realizada por agentes, que son elementos del modelo que colectan información de su entorno, toman decisiones basadas en esa información y actúan. Ver la Fig. 1. De esta forma se construyen en el ordenador *sociedades artificiales* compuestas por colecciones de agentes que interactúan entre si y con el ambiente que les rodea. Estas sociedades artificiales pueden ser controladas experimentalmente (algo imposible de realizar en sociedades tradicionales) para estudiar los efectos de algún comportamiento específico o parámetro, ya sea del medio ambiente o del sistema (Epstein *et al*, 1996). La investigación que se realiza de esta manera permite estudiar movimientos dinámicos (en vez de estados de equilibrio), procesos de distribución y formación de jerarquías (en vez de dar por sentado la presencia de niveles en el sistema), así como la aparición de patrones de relación entre agentes (en vez de relaciones entre variables globales del sistema).

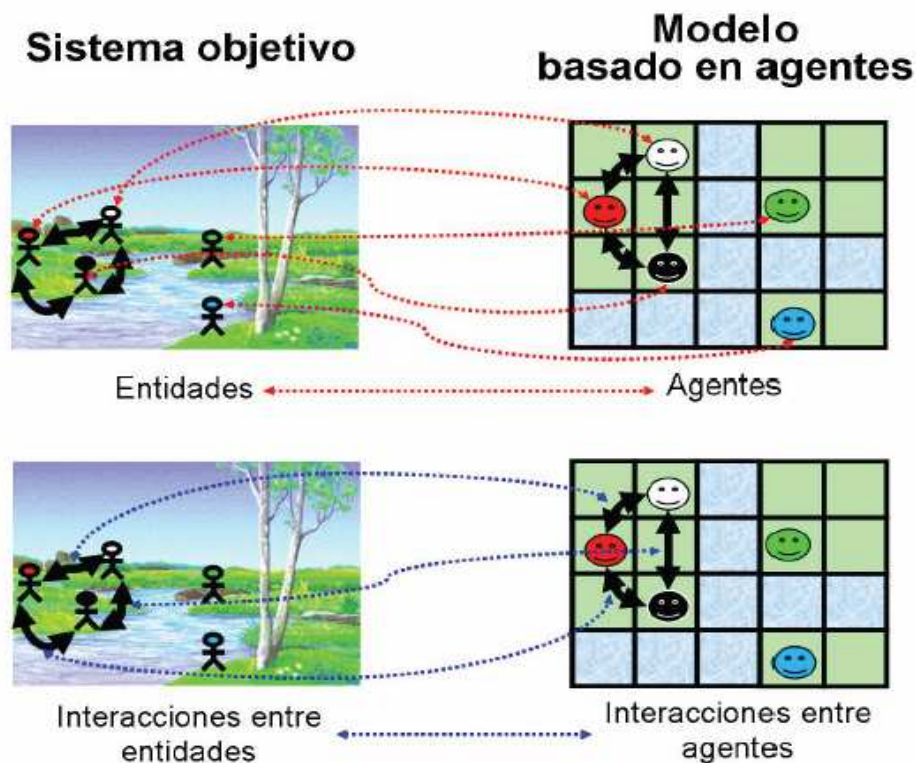


Fig. 1. En los modelos formales construidos mediante simulación basada en agentes, los componentes básicos del sistema real y las interacciones entre ellos están explícita e individualmente representados en el modelo. (Figura tomada de Izquierdo *et al* (2008)).

El interés en esta herramienta se ha extendido a diferentes ramas del saber formando puentes entre ciencias que antes estaban separadas. Por ejemplo, han sido realizados importantes trabajos en ciencias sociales (Axelrod, 1997a, Sigmund, 2010), en las humanidades (Kohler *et al*, 2000), y ciencias biológicas (Murray, 2002; Grimm, 2005).

Los modelos basados en agentes representan una promesa de nueva herramienta de estudio donde se pretende entender los fenómenos sociales a partir de su “construcción paso a paso”, es decir, construyendo sociedades artificiales desde sus agentes hasta sus interacciones. La fortaleza de esta herramienta radica es su enfoque diferente respecto de la práctica tradicional de las ciencias sociales donde se analizan variables estáticas que se asumen constantes y está fija la relación entre los agentes de una sociedad y el medio ambiente. Al utilizar modelos computacionales dinámicos se puede asumir y estudiar las interacciones cambiantes y adaptables entre los agentes del sistema, y entre estos y el medio ambiente. Es decir, es posible, simular la dinámica cambiante de las interacciones entre agentes sociales de acuerdo a ciertas reglas que pueden ser complicadas y cambiantes con el tiempo. Estos problemas son generalmente intratables utilizando la matemática analítica.

Los científicos, al construir sus modelos, deben primeramente realizar el trabajo duro de determinar los posibles parámetros relevantes del sistema de estudio y dotar a los

agentes del modelo a construir con comportamientos típicos cuyos efectos se desea estudiar. La simulación será así útil en la medida en que se acepte que el científico ha capturado los aspectos relevantes del problema de estudio en la sociedad artificial construida. Claro está que no se espera que estos mundos artificiales sean verdaderas sociedades, mas bien se espera que sean como sociedades reales en algún aspecto útil, y esta utilidad vendrá dada por la posibilidad de que estas sociedades artificiales ayuden a construir la teoría de la complejidad de sociedades reales (Kohler *et al*, 2000).

Los Modelos Basados en Agentes son útiles cuando se tiene:

- Sistemas con componentes individuales heterogéneos.
- Sistemas adaptativos: agentes capaces de aprender.
- Sistemas en los que el espacio geográfico puede tener una influencia significativa.
- Sistemas donde existen redes sociales de interacción.
- Sistemas donde se desea analizar en profundidad la relación existente entre los atributos y comportamientos de los individuos (la “micro-escala”) frente a las propiedades globales del grupo (la “macro-escala”).

Como ya se mencionó, son numerosos los trabajos donde se ha desarrollado e implementado esta herramienta en diferentes ramas de las ciencias naturales y las ciencias sociales. Dos de estos trabajos pioneros fueron los realizados en las ciencias sociales por Schelling (1971) y por Epstein & Axtell (1996). El primero de ellos estudió la formación y segregación de grupos diferenciados de individuos en un modelo sencillo de agentes. Lo interesante de su trabajo fue la aparición de patrones de segregación sin que esta condición estuviera explícitamente impuesta en las reglas del modelo. De esta forma el modelo sorprendió con sus resultados al describir claramente una propiedad emergente del sistema que no estaba impuesta sobre los agentes del mismo. Era a partir de las interacciones locales entre los individuos de esta sociedad artificial que aparecían patrones de fuerte segregación aún cuando los individuos tenían una alta tolerancia a la diversidad. Este trabajo mostró el potencial de los modelos basados en agentes para explicitar propiedades globales implícitas de los Sistemas Complejos que no son evidentes a primera vista, pero que emergen en un estudio dinámico más detallado del sistema.

El segundo trabajo (Epstein & Axtell, 1996) consiste en la simulación computacional de una sociedad artificial donde, entre otras acciones posibles, los agentes se desplazan, comen, se reproducen, luchan entre si por recursos, comercian y enferman. Este modelo se convirtió en un modelo mucho más elaborado debido a la amplia variedad de acciones que pueden realizar sus agentes. La ventaja del mismo viene dada por la posibilidad de estudiar una amplia variedad de diferentes comportamientos de los individuos del sistema, pero a su vez, resulta más difícil obtener conclusiones claras sobre las implicaciones de cada una de las actividades que pueden realizar los agentes.

Con el tiempo se han ido desarrollando más modelos para comprender y explicar diferentes situaciones sociales. Otro importante trabajo lo constituye el desarrollado por Robert Axelrod en donde estudia la cooperación entre individuos (Axelrod, 1997a) y la formación de culturas (Axelrod, 1997b).

Debido al número creciente de diferentes modelos computacionales, algunos autores han propuesto implementar lo que han denominado “alineación de modelos computacionales”. Esta herramienta sería importante para determinar si dos modelos computacionales diferentes pueden conducir a los mismos resultados bajo condiciones equivalentes. Un trabajo pionero en esta dirección fue reportado en Axtell *et al* (1996), donde los autores comparan el modelo de Axelrod para el estudio de la formación de culturas con el modelo más amplio desarrollado por Epstein & Axtell (1996) y encuentran las condiciones bajo las cuales ambos modelos producen los mismos resultados.

Lo que se pretende es poder definir cuándo un modelo computacional “contiene” a otro, en el mismo sentido en que la mecánica relativista de Einstein contiene a la mecánica clásica de Newton. De esta forma se establecerían formalmente límites de aplicabilidad de los modelos computacionales ya establecidos contribuyendo a ordenar toda la información sobre los modelos computacionales existentes para el estudio de diferentes fenómenos sociales.

4. Conclusiones.

En el presente trabajo hemos acotado los Sistemas Complejos, sin pretender dar una definición formal de los mismos y se han enumerado las propiedades que consideramos más importantes.

Igualmente se estudiaron las diferencias conceptuales y operativas entre los sistemas complicados y los Sistemas Complejos, dada la importancia que consideramos esta distinción tiene al abordar el estudio de un sistema, ya sea físico o social. Reconocer esta primera diferencia permite orientarnos en las herramientas de análisis a utilizar y la forma de estudiar el sistema, ya sea mediante un método reduccionista u holista, según sea el caso.

Posteriormente se abordó la descripción de los Sistemas Complejos Sociales y se intentó mostrar argumentos para responder la pregunta de porqué estos sistemas son más complejos que los Sistemas Complejos físicos.

Finalmente, se introdujeron los modelos basados en agentes como una herramienta novedosa y poderosa para el estudio de los Sistemas Complejos Sociales donde hay un alto grado de asimetría y heterogeneidad de sus componentes individuales. También fueron enumerados algunos casos relevantes de modelos computacionales que se han convertido en puntos de referencia para los estudios sociales.

Bibliografía:

- Axelrod, R. (1997a), *The complexity of cooperation*, Princeton, New Jersey.
- Axelrod, R. (1997b), *The dissemination of culture*, Journal of Conflict Resolution **41**, 203.
- Axtell, R., Axelrod, R., Epstein, J. M., & Cohen, M. D. (1996), *Aligning simulation models: a case study and results*, Computational and Mathematical Organization Theory **1**, 123 – 141.
- Capra, F. (1989): *El punto crucial*, Barcelona: Integral Ed.
- Epstein, J. M., & Axtell, R. L. (1996), *Growing Artificial Societies*, Washington D.C.: The MIT Press.
- Gilbert, N., & Conte, R. (1995), *Artificial Societies*, Routledge, London.
- Grimm, V., & Railsback, S. F. (2005), *Individual-based Modeling and Ecology*, New Jersey: Princeton University Press.
- Izquierdo, L. R., Galán, J. M., Santos J. I., & Olmo, R. (2008), *Modelado de sistemas complejos mediante simulación basada en agentes y mediante dinámica de sistemas*, EMPIRIA **16**, 85 – 112.
- Kohler, T. A., & Gunmerman, G. J. (2000), *Dynamics in human and primate societies*, Oxford: University Press.
- Miller, J. H. & Page, S. E., (2007): *Complex Adaptive Systems*, New Jersey: Princeton University Press.
- Murray, J. D. (2002): *Mathematical Biology*, Berlín: Springer Verlag.
- Kuhn, T. S. (1962): *The structure of the scientific revolutions*, University of Chicago Press.
- Schelling, T.C. (1971): *Dynamic Model of Segregation*, Journal of Mathematical Sociology **1**(2), 143 – 186.
- Sigmund, K. (2010): *The calculus of selfishness*, New Jersey: Princeton University Press.