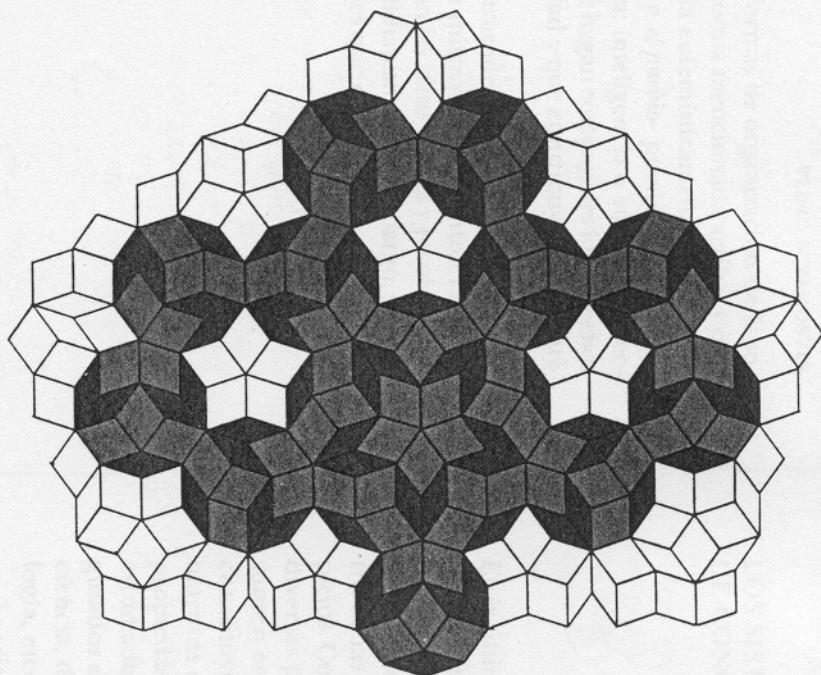




# Perspectivas en las teorías de sistemas

*Santiago Ramírez† (coordinador)*

*Germinal Cocho, Carlos Torres Alcaraz,  
Javier Torres Nafarrate, Guy Duval, Pedro Miramontes,  
Octavio Miramontes, José Luis Gutiérrez Sánchez*



Siglo XXI Editores, México, D. F. 1999

Estamos seguros de que existen formas de organización de la sociedad que pueden superar la dicotomía mencionada arriba, y que estas organizaciones –instancias de la eufemísticamente llamada *sociedad civil* y que no es otra cosa que *el pueblo*– pueden dar lugar a propiedades de emergencia colectiva: inteligencia o emoción colectivas, metafóricamente hablando, que hagan compatibles los derechos del individuo con los de la comunidad y que contribuyan a la aparición de una sociedad más justa.

No podemos descartar que nuestras ideas y planteamientos a su vez se conviertan fatalmente en las mismas iglesias intolerantes y beatíficas en que se metamorfosearon las ideas frescas y revolucionarias del darwinismo, marxismo y freudianismo. Sin embargo, no dudamos de que vendrán nuevos herejes que contribuirán a su sustitución; los saludamos desde ahora.

## LOS SISTEMAS COMPLEJOS COMO INSTRUMENTOS DE CONOCIMIENTO Y TRANSFORMACIÓN DEL MUNDO

OCTAVIO MIRAMONTES\*

En la última década se ha producido, en prácticamente todos los campos del quehacer científico, una importante transformación conceptual y metodológica ligada íntimamente al estudio de los llamados fenómenos no-lineales, cuyo análisis se engloba, parcialmente, dentro de las llamadas ciencias de la complejidad o de los sistemas complejos. Como parte de esta nueva visión, se ha puesto en evidencia que diversas propiedades espacio-temporales de los sistemas complejos surgen espontáneamente a partir de interacciones de los elementos constituyentes, en escalas de tiempo y longitud considerablemente mayores que las escalas donde ocurren dichas interacciones. Estas propiedades, llamadas propiedades emergentes, han comenzado a ser estudiadas con una familia nueva de herramientas y de conceptos originados en la interacción interdisciplinaria de varios campos de la ciencia, desde la física, la biología, la química, la economía, la sociología, etcétera.

Los sistemas complejos están formados por un conjunto grande de componentes individuales que interactúan entre sí y que pueden modificar sus estados internos como producto de tales interacciones. Tales sistemas pueden ser estructuralmente simples, aunque tal simplicidad no impide que exhiban comportamientos dinámicos diversos y no triviales. Los sistemas complejos pueden situarse en regímenes críticos caracterizados por la presencia de fluctuaciones espaciales y temporales en todas las escalas posibles. Esta situación de criticalidad puede alcanzarse de manera espontánea y sin la intervención de factores o fuerzas externas al sistema; se habla entonces de un proceso autoorganizado. El proceso de interacciones puede generar comportamientos colectivos y globales. Es decir, conductas que no están definidas en los elementos individuales, pero que emergen como un proceso colectivo y que no pueden ser reducidas ni explicadas tomando aisladamente los elementos constituyentes.

\* Departamento de Sistemas Complejos, Instituto de Física, UNAM.

En la naturaleza existe un sinnúmero de ejemplos de sistemas complejos, que van desde las reacciones químicas autocatalíticas hasta los procesos sociales y culturales. La naturaleza posee una fuerte tendencia a estructurarse en forma de entes discretos excitables que interactúan y se organizan en niveles jerárquicos de creciente complejidad; por ello, los sistemas complejos no son de ninguna manera casos raros ni curiosidades, sino que dominan la estructura y función del universo. Constituyen la inmensa mayoría de los fenómenos observables y se manifiestan en ellos. Sin embargo, y aquí radica una de sus propiedades más interesantes, la abundancia y diversidad de los sistemas complejos (sean de tipo físico, químico, biológico, social, etc.) no implican una innumerable e inclasificable diversidad de conductas dinámicas diferentes. Todo lo contrario, los sistemas complejos poseen propiedades genéricas, independientemente de los detalles específicos de cada sistema o de la base material del mismo. De esta manera, y como ya se explicó en otro texto de este libro, una computadora construida con bulbos, otra con transistores y una más con relevadores electromagnéticos serían capaces de realizar, en principio, las mismas tareas de procesamiento de datos. Podríamos incluso ir más lejos con este ejemplo, y agregar que el sistema nervioso humano posee propiedades tales como memoria difusa y reconocimiento de patrones que funcionan de la misma manera como funciona una computadora de bulbos o de transistores. Lo que comparten es una estructura interconectada y formada por elementos individuales (neuronas o circuitos electrónicos) que interactúan para intercambiar información y modificar sus estados internos. Ello hace posible la emergencia de fenómenos globales y colectivos semejantes, sin que los detalles materiales del sistema sean del todo relevantes. De esta manera, es posible identificar propiedades dinámicas similares entre una computadora, el sistema nervioso, el sistema inmunológico, la tectónica de placas, una sociedad de insectos, el crecimiento urbano, las economías de mercado, el tráfico vehicular, etc., a pesar de la aparente disparidad entre estos sistemas.

La aportación fundamental de la ciencia de los sistemas complejos en la tarea de conocer y transformar nuestra realidad es identificar los principios y fundamentos generales de la operación de dichos sistemas sin importar los detalles particulares de su realización material. Así, por ejemplo, podemos imaginar un biólogo del futuro que estudiaría el fenómeno llamado "vida" desde una perspectiva de principios (¿tal vez leyes?) generales. Tal biólogo tendría conciencia de que

el fenómeno "vida" tal y como existe en la Tierra es tan sólo un caso particular de cómo "la vida" se ha manifestado en las condiciones particulares de la Tierra, expresándose con la forma de una realización material muy específica (una bioquímica de carbono predominantemente levógira). Sin embargo, este biólogo estaría preparado para identificar el fenómeno "vida" si acaso fuera detectado en otro planeta o parte del universo en otras realizaciones materiales específicas, de la misma manera que un físico hoy en día sabe que la ley de gravitación lo mismo es válida para la superficie de la Tierra que para la superficie de Marte o para cualquier otra parte del universo. El ejemplo puede ir aún más lejos. Podemos imaginar un sociólogo del futuro que será capaz de identificar los principios generales del fenómeno "social" independientemente de que éste ocurra en grupos humanos, animales, microbios, plantas, robots o, incluso, si su colega biólogo tiene suerte, en grupos sociales fuera de nuestro planeta.

Algunos de los principios generales a los que hacemos mención arriba son la existencia de leyes de escalamiento, la formación de patrones espaciales de autoorganización y los procesos colectivos emergentes. Sin pretender agotar la lista, a continuación detallaremos algunos ejemplos de estas propiedades.

#### LEYES DE POTENCIAS

Las leyes de escalamiento (leyes de potencias) en las fluctuaciones espaciales y temporales de un sistema complejo implican la inexistencia de escalas específicas en las que el fenómeno es válido y fuera de éstas no lo es; es decir, el fenómeno se manifiesta y es válido en todas las escalas del sistema conservando las mismas propiedades que lo caracterizan. Por ejemplo, la ley de decaimiento de la intensidad de la luz cuando viaja por el espacio. La intensidad disminuye en función de la distancia recorrida ( $r$ ) como  $r^{-2}$  es decir, que después de recorrer una distancia  $r$  dada, la intensidad de la luz será menor en un factor  $r^{-2}$  de su intensidad inicial, independientemente de que la distancia recorrida haya sido de miles de años luz o de apenas algunos milímetros. Lo cual quiere decir que no existe una escala de longitud especial para la cual esta ley no se comporte como proporcional a  $r^{-2}$ .

Cuando en un sistema complejo los eventos o fluctuaciones están distribuidos bajo una ley de potencias, los eventos de grandes mag-

nitudes ocurren con muy poca frecuencia; mientras que eventos de magnitudes pequeñas ocurren más frecuentemente y la proporción de unos y otros está relacionada por una ley de potencias con exponentes característicos. Muchas veces tales leyes de potencias ponen en evidencia sistemas con estados autoorganizados o críticos.

Una de las leyes de potencias más famosa la constituye la llamada ley de Gutenberg-Richter (Gutenberg y Richter, 1949), que relaciona la magnitud de los temblores con el número de veces que éstos ocurren. La explicación de la existencia y origen de los temblores está basada en la teoría de la tectónica de placas. La superficie de la Tierra es en realidad una costra sólida que flota en el magma fluido del interior. La costra está rota en trozos llamados placas, que se encuentran en movimiento debido a las corrientes de magma, y ello provoca choques y acumulación de "tensión" entre ellas. La tensión puede liberarse de manera súbita y propagarse, es entonces cuando ocurren los temblores. Es más o menos directo identificar que el sistema de placas tectónicas es en realidad un sistema complejo formado por entes individuales (las placas) que interactúan entre sí dispersando energía (temblores).

Si se grafica, en una escala de ejes logarítmicos, el tamaño de los temblores registrados contra el número de temblores que se registran en cada categoría de magnitud, se obtiene una línea recta decreciente que delata un proceso que obedece una ley de potencias. La interpretación es inmediata: temblores de magnitudes pequeñas ocurren con una frecuencia mucho mayor que los temblores con magnitudes catastróficas, y la relación entre magnitud y frecuencia no es azarosa, obedece a una ley cuantitativa específica. Lo sorprendente de esta "ley de temblores" es que lo mismo es válida para el planeta entero como para una región específica que podría ser, por ejemplo, la costa de Oaxaca: Ya un geofísico, no necesariamente del futuro, esperaría encontrar una ley de potencias en cualquier otro cuerpo del sistema solar o universo que tuviera actividad tectónica.

En ciencias sociales, particularmente en economía, existen muchos casos conocidos de procesos que obedecen a leyes de potencias simples en la distribución de eventos. Uno de los primeros ejemplos de tales leyes de potencias se debe al economista italiano Vilfredo Pareto (1848-1923), quien descubrió que el número de personas cuyos ingresos individuales exceden una cierta cantidad sigue una ley cuantitativa de potencias (Schroeder, 1991). Los ricos que acumulan una inmensa riqueza son muy pocos mientras que los pobres con ingresos

minúsculos son la gran mayoría. Esta "ley de distribución de la riqueza", que caracteriza las sociedades capitalistas modernas en las que la riqueza no se socializa, es válida en todas las escalas. Es decir, es válida en una nación entera donde abundan los pobres y escasean los ricos, y es válida en ámbitos regionales y locales donde el propietario de un comercio es el único rico rodeado de empleados que piramidamente reciben ingresos decrecientemente menores de acuerdo con sus calificaciones laborales, nivel de entrenamiento, antigüedad, etc. Un economista agudo percibiría rápidamente que la ley de Pareto es igualmente válida para Estados Unidos, Gran Bretaña o México y que de hecho lo es quizá para el mundo globalmente neoliberal de nuestros tiempos.

Los ejemplos de leyes de potencias en economía son verdaderamente abundantes. Benoit Mandelbrot (Mandelbrot, 1983), un matemático muy conocido por su trabajo en la teoría de los fractales, ha identificado algunas más. Mandelbrot colectó los índices en las variaciones de precios de diversos bienes de consumo en Estados Unidos, incluyendo el algodón. Estos datos, que contenían las variaciones mensuales durante varios años, revelaron una ley de escalamiento en forma de potencias tanto para el algodón como para los demás bienes. Las pequeñas variaciones de los precios ocurrían con mucha frecuencia, mientras que las variaciones grandes ocurrían muy poco; pero tales variaciones no eran al azar, estaban relacionadas mediante una ley de escalamiento, de igual manera que lo están los temblores mediante la ley de Gutenberg-Richter. Aquí cabe mencionar varias consecuencias importantes de este hallazgo. Primero, que las variaciones repentinas y de gran tamaño en los precios de bienes, en los índices de las bolsas de valores, etc., y que por lo general traen ligadas consecuencias nada benéficas para economías débiles como la mexicana, son inevitables por más que el pensamiento económico hoy dominante se esfuerce por convencernos (sin aportar pruebas más allá de la simple retórica) de la existencia de "equilibrios de mercados", "estabilización económica", etc., que ocurren de manera "natural". Tales "equilibrios" son quizá una de las mayores debilidades de la teoría económica actual, las fluctuaciones de dimensiones grandes y consecuencias potencialmente catastróficas son generadas de manera intrínseca por un proceso de interacciones económicas, y por ello son inevitables cuando no existen mecanismos de regulación específicos para atajarlas o al menos minimizarlas. Este modo de ver las cosas es un perfecto ejemplo de un pensamiento lineal que hoy en día,

al menos en las ciencias naturales, resulta, en el mejor de los casos, incompleto y superficial.

Un sistema económico es un sistema complejo con entes individuales (empresas, fábricas, comercios, individuos, etc.) que interactúan de maneras diversas para generar estructuras (mercados) más allá del ámbito meramente local. El llamado proceso de globalización no es sino una intensificación y una diversificación de un proceso de interacciones entre agentes económicos. Una economía mundial estrechamente interconectada y dejada a su libre albedrío (libre juego de mercados) no es muy diferente, en ciertos aspectos genéricos, del proceso de tectónica de placas que ya discutimos.

La similitud entre la dinámica de un sistema económico complejo y otros ejemplos de sistemas complejos físicos es grande, comparten propiedades genéricas que hoy comienzan a entenderse con mayor profundidad. De hecho, las analogías que históricamente se han hecho entre los sistemas económicos y la física son abundantes. Términos como "equilibrio económico" están inspirados en la termodinámica clásica, que no considera procesos fuera del equilibrio (que, por cierto, son casi todos los que ocurren espontáneamente en la naturaleza). Es decir, sistemas en un universo en el que continuamente se intercambia materia y energía. Una teoría económica más acorde con la realidad debería tomar en cuenta esta poco probable existencia de "equilibrios" y reconocer que el mundo económico es profundamente no-lineal. Afortunadamente, los trabajos en esta dirección ya han comenzado. No me detendré a detallar más ejemplos; basta decir que se han identificado más leyes de potencias y procesos interesantes de escalamiento en temas como la dinámica de formación de empresas (Stanley *et al.*, 1995 y 1996), la dinámica de los índices de cotizaciones y precios (Mantegna *et al.*, 1995 y 1997), etc. Indudablemente, la ciencia de los sistemas complejos proporcionará a la economía un nuevo marco teórico para analizar el fenómeno "económico" con un mayor grado de realismo, desde una perspectiva no-lineal (Anderson, 1988; Arthur, 1997) y lo mismo podría decirse de otras ciencias sociales como la psicología, la ciencia política, la sociología, etcétera.

#### EMERGENCIA DE PATRONES ESPACIALES

La dinámica de los sistemas complejos puede resultar en patrones globales que cubren toda su extensión espacial. Estos patrones surgen a través de una dinámica de interacciones locales, de tal manera que donde antes había un espacio desordenado o completamente homogéneo, ahora surgen orden y estructuras que emergen de manera espontánea porque el sistema se encuentra fuera del equilibrio, termodinámicamente hablando. Estos sistemas son capaces entonces de crear orden espacial (ruptura de simetría) en donde no lo había anteriormente; esto se logra debido a un proceso de interacciones locales y sin que tal orden haya sido especificado de antemano en el diseño del sistema o de sus componentes individuales. Es un orden emergente.

Uno de los fenómenos espaciales autoorganizados más conocido lo constituyen las ondas espirales en sistemas con interacciones locales. En química estas ondas espirales fueron identificadas por primera vez por los soviéticos Belusov y Zhabotinski (B-Z) en los años sesenta (Nicolis y Prigogine, 1989). Al igual que los economistas de hoy, los químicos de la época de B-Z pensaban que toda reacción química que fuera abandonada a sí misma produciría un simple estado homogéneo similar a un equilibrio. El hallazgo de B-Z revolucionó por completo este modo de pensar. Estos químicos encontraron que ciertas reacciones químicas pueden generar un rango muy interesante de fenómenos inesperados. Pueden, por ejemplo, comportarse como un reloj oscilando entre dos estados de diferentes concentraciones de reactivos que se aprecian bajo la forma de un paso de un color a otro y viceversa. Este reloj es emergente, es como si el sistema hubiera súbitamente inventado un orden donde antes sólo existía homogeneidad. El sistema oscila entre dos estados diferenciados donde anteriormente sólo existía uno.

En ciertas condiciones específicas, la reacción de B-Z genera ondas espirales que se desarrollan en el espacio de la reacción. Estas ondas están formadas por zonas de diferentes concentraciones de reactivos (figura 1). Estos patrones, sin embargo, no son específicos de las reacciones químicas, están presentes en otros sistemas en los que existen interacciones de elementos individuales. Por ejemplo, están presentes en los patrones que se forman en los medios granulares (granos de arena, por ejemplo) bajo la acción de energía mecánica en pulsos o, en un nivel de mayor complejidad, están presentes

en la formación de patrones de agregación de ciertos microorganismos cuando éstos pasan de una fase solitaria a una fase de organización social. Estas ondas en espiral también se han identificado en la actividad eléctrica del corazón, en modelos matemáticos de dinámica de poblaciones, etcétera.

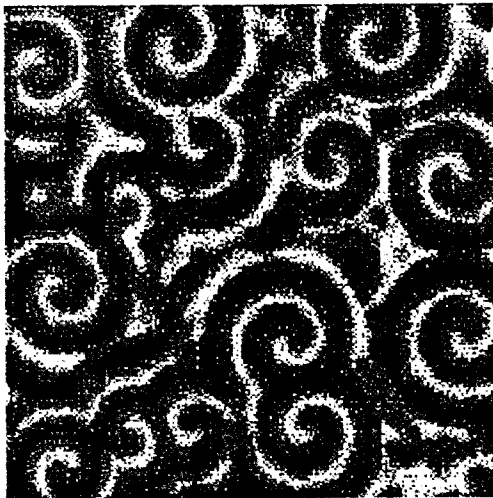


FIGURA 1. Ondas en espiral. Estas estructuras espaciales surgen de manera autoorganizada en una diversidad de sistemas complejos, que van desde las reacciones químicas, procesos de agregación social, actividad eléctrica en el corazón o dinámica de medios granulares.

Otros ejemplos importantes de dinámicas espaciales genéricas están presentes en los sistemas que se encuentran en regímenes críticos, es decir, en las cercanías de una transición de fase, y en donde un cambio minúsculo en el parámetro de control puede llevar al sistema a comportamientos dinámicos profundamente diferentes. Un ejemplo de esto lo constituyen los imanes que se magnetizan o desmagnetizan en función de la temperatura a la que se somete el material susceptible de ser magnetizado. En el punto de la transición entre imán y no-imán existen, en el nivel microscópico, estructuras formadas por regiones de imantación “sur” e imantación “norte”. Estas regiones se encuentran embebidas unas dentro de otras, de tal manera que son como mares de imantación “norte”, en los que existen islas de

imantación “sur”. Dentro de esas islas de imantación “sur” existen “lagos” de imantación “norte” y dentro de estos lagos existen islas de imantación “sur”, y así sucesivamente hasta llegar a la escala mínima del sistema. Esta propiedad geométrica se llama autosimilitud.

Además de los imanes, las estructuras autosimilares se encuentran presentes en una gran cantidad de fenómenos en el universo y en diferentes escalas de organización de la materia. Tales estructuras autosimilares son muy frecuentes en biología: por ejemplo, una raíz de un árbol que tiene ramificaciones que tienen ramificaciones que a su vez tienen ramificaciones, etc. En sociología, las estructuras autosimilares en punto crítico fueron sugeridas por Haken cuando existe una concentración de personas que se dispersan (Haken, 1986). Por ejemplo, inmediatamente después de un mitin político, una vez que la atención de los participantes ha terminado de estar concentrada en los oradores. Todo ese conjunto de personas interactúa de manera local, y existe un punto en el cual se pueden apreciar grupos grandes de personas, mezclados con grupos pequeños y con individuos aislados. Esta geometría obedece a una ley de potencias. Pocos grupos grandes y muchos grupos pequeños. Esta propiedad existe también en otros grupos sociales: las termitas.

Los patrones de agregación espacial de organismos sociales es un tema de intenso estudio en nuestros días. Si bien no es posible estudiar experimentalmente de manera extensa grupos humanos, los estudiosos de los grupos sociales desde una perspectiva de sistemas complejos autoorganizados han observado intensamente los mecanismos genéricos de conducta social en sociedades de insectos. Un ejemplo que merece ser mencionado lo constituye el estudio de un tipo de hormigas cuyos individuos se comportan de manera caótica cuando están aislados; pero lo hacen de manera sincronizada cuando están involucrados en interacciones sociales (Cole, 1991). Este proceso, llamado facilitación social, produce un orden espontáneo donde no lo había anteriormente. De hecho, una colonia de estas hormigas se comporta como un reloj, oscilando entre un estado de reposo (los individuos permanecen inmóviles) y un estado de gran actividad con un periodo de oscilación de media hora aproximadamente. Ahora podemos ver cuán semejante es este proceso genérico que se manifiesta en la conducta social de estos organismos con respecto al proceso del reloj químico en la reacción química B-Z. La conducta social de estas hormigas se traduce también en estructuras espaciales definidas. Por ejemplo, la zona donde se localizan los huevecillos y las

larvas tiene una simetría circular que puede ser observada en modelos matemáticos en los cuales únicamente se fijan conductas similares entre las hormigas reales y los autómatas que las simulan. La generación de oscilaciones y patrones espaciales con simetría espacial emerge porque son patrones genéricos entre entes excitables, y no porque sean propiedades únicas y exclusivas de las hormigas.

La facilitación social no existe únicamente en insectos, existe en todo grupo de individuos que es capaz de interactuar cooperativamente con sus semejantes. En los humanos se conocen situaciones claras de facilitación social, aunque aún no completamente exploradas en cuanto a su dinámica espacial. Por ejemplo, las mujeres (seguramente también los hombres) consumen más cuando van de compras en grupo que cuando van en solitario. Los humanos comemos y bebemos en mayor cantidad cuando estamos en grupos que cuando estamos solos (DeCastro, 1995). Todo esto lo hacemos de manera inconsciente, pues se trata de propiedades colectivas, espontáneas y emergentes.

## TEORÍAS, SISTEMAS Y COMPRENSIÓN DEL MUNDO

JOSÉ LUIS GUTIÉRREZ SÁNCHEZ\*

Primero, una reflexión precautoria: desde sus orígenes, las ciencias llamadas, torpemente, "duras" sintetizaron con éxito la imaginación y la matemática (que posiblemente sólo sea un tipo especial de práctica imaginativa) para comprender, explicar, transformar y controlar *su mundo*, que fue tornándose cada vez más complicado conforme la física y la química maduraban, pero que es esencialmente diferente de los universos de lo humano y lo social; asimismo, algunos intentos por ver aquí sistemas equiparables a los de las ciencias de la materia implican una trasposición metodológica, no necesariamente acertada, a disciplinas que se ocupan de procesos en donde los actores no son partículas, átomos o células, sino seres humanos con necesidades y esperanzas, creencias e intenciones, inteligencia y voluntad.

Las diferentes actitudes ante la extensión de los instrumentos de análisis de uno a otro dominio del conocimiento son elementos de un problema vigente, cuyas componentes ideológicas es necesario advertir. La resistencia o el escepticismo de muchos científicos sociales y humanistas a estudiar los procesos sociales con las herramientas matemáticas de la física, la química o zonas cada vez más amplias de la biología, puede ser una toma de posición en contra de la posibilidad de unificación de la ciencia, o quizá es una forma de rechazo al uso indiscriminado y acrítico de esas herramientas para justificar medidas económicas y encubrir con ellas decisiones políticas.

Es posible que esa resistencia sea una respuesta a los abusos de administradores y tecnócratas que, con una ecuación en el portafolios o la computadora, producen desastres humanos devastadores en nombre del libre mercado y de la globalización de la economía, y usan la modelación matemática como un fetiche de credibilidad científica para su política, sin la menor atención a la validez de las hipótesis sobre las que sus modelos han sido construidos.

\* Programa de Agroecología de la Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Matemáticas de la Facultad de Ciencias, UNAM.