

## INTRODUCCIÓN

Nos mueve inmodestamente la intención de preparar, siguiendo el ejemplo de Conrad H. Waddington, un “instrumental para el pensamiento”, un nuevo *Organon*, de Aristóteles, o un *Novum Organum* baconiano, cuyas herramientas contribuyan a tender puentes entre los más diversos dominios del conocimiento para salir del pasmo en el que hoy se encuentran las ciencias poco formalizadas.

A lo largo de los siglos, la humanidad ha sido a menudo enfrentada a posiciones extremas, ante las cuales la aparición de síntesis juiciosas y prudentes ha permitido enormes logros en nuestra comprensión del universo. Hoy, el desarrollo de la ciencia se encuentra atrapado entre el determinismo mecanicista y el historicismo<sup>1</sup> contingencista. El estructuralismo dinámico pretende superar las deficiencias de ambos sin negar que han generado conocimiento valioso y fomentado el desarrollo de métodos matemáticos poderosos y útiles.

\* Departamento de Matemáticas de la Facultad de Ciencias, UNAM.

<sup>1</sup> Es necesario precisar el sentido del término *historicismo*, pues una de sus acepciones más extendidas es la que propone Karl Popper en su obra *La miseria del historicismo*. Allí, el autor define con pertinencia y claridad el sentido que le da al vocablo: “I mean by ‘historicism’ an approach to the social sciences which assumes that historical prediction is their principal aim, and which assumes that this aim is attainable by discovering the ‘rhythms’ or the ‘patterns’, the ‘laws’ or the ‘trends’ that underlie the evolution of history.” Es difícil encontrar una acepción más contrapuesta a la que nosotros usamos; en nuestro esquema, “historicismo” es la *narración descriptiva* de los acontecimientos que se suceden a lo largo del tiempo. Cuando le agregamos el adjetivo *contingencista* entonces adquiere una connotación diametralmente opuesta a la de Popper: es el enfoque en las ciencias (no únicamente las sociales) que niega la existencia de “ritmos”, “patrones”, “tendencias” o “leyes”. Viene al caso comentar que Popper descalifica al marxismo por considerarlo historicista en el sentido que él lo define. Popper murió antes de saber que la existencia de ritmos y patrones no es equivalente al determinismo predictivo y aunque se atribuía a sí mismo el descubrimiento del *caos*, nunca entendió que la esencia del mismo permite la existencia de un mecanismo determinista con la ausencia de predictibilidad.

El segundo componente de nuestra propuesta es político y se dirige a superar otro pasmo: la estupefacción en la que ha caído un sinnúmero de personas y organizaciones progresistas y de izquierda ante la avalancha triunfal y revanchista de la derecha política y académica. Estamos persuadidos de que nuestras “herramientas para el pensamiento” son argumentos sólidos de los que se pueden obtener argumentos convincentes para oponerlos al reduccionismo y al pensamiento dogmático y simplista que esgrimen tanto los intelectuales de la nueva derecha como los comunistas de manual y consigna.

## SISTEMAS

*El conflicto es universal y la lucha es justicia; todo lo existente se engendra y desaparece a través de las confrontaciones.*

HERÁCLITO (540-480 a.e.)

La palabra *sistema* parece ocupar un lugar privilegiado en el léxico de las ciencias, tanto naturales como sociales. Este hecho, en lugar de ser un agente aglutinador de disciplinas ajenas, es un ingrediente de confusión y dispersión, pues el significado del término es distinto en diferentes áreas del conocimiento. Peor aún, al sustantivo se le aplican diversos modificadores que incrementan el desconcierto: se habla de *sistemas formales*, de *teoría general de sistemas*, de *enfoques sistémicos*, de *sistemas complejos*, etc., y todo ello con la mayor laxitud e imprecisión. Yo empezaré diciendo qué entiendo, primero, por *sistema*, y después, por *sistema complejo*.

En Grecia, en el siglo V antes de nuestra era, Demócrito de Abdera afirmaba que el universo está formado de átomos de diferentes tamaños y formas, cuyas diferencias determinan la infinita variedad de cosas existentes a nuestro alrededor. Sostenía que no existen en la naturaleza cambios cualitativos o sustanciales, pues las aparentes alteraciones que observamos son sólo reacomodos de las unidades elementales, inmutables en sí. En otras palabras, estamos compuestos de cosas y los cambios observables no son sino permutaciones de esas cosas.

Un siglo antes, Heráclito de Efeso razonaba de otra manera; para él, como resume en el epígrafe, el cosmos es un cambio permanente, pues todas las cosas se encuentran interrelacionadas, las unas y las

otras se afectan mutuamente; el motor de este cambio es un conflicto entre opuestos, una confrontación eterna de antagonistas. En su universo cambiante, el sol que nos alumbra hoy no es el mismo que el de ayer, pues su relación con las otras partes del cosmos ya no es la misma.

Esta divergencia ha marcado, desde entonces, el desarrollo de la ciencia y de la filosofía: en ella se establece una dualidad en la discusión acerca de la verdadera y última naturaleza del universo: por una parte, una concepción estática que subraya la base material que moldea el mundo y otra que es una concepción dinámica, un principio que pone el acento más en los procesos que en los objetos.

Para nosotros, los sistemas son *las cosas más los procesos*. Consecuentemente, un sistema consta de una base material y de un conjunto de relaciones entre los objetos que lo constituyen. Esta definición no es un compromiso equidistante de los extremos de la dicotomía mencionada; en el debate entre Demócrito y Heráclito, nos inclinamos por el segundo: sin desdeñar su base material, los procesos constituyen el aspecto relevante en los sistemas. Por ejemplo, una computadora genera manifestaciones externas que nos dan una idea acerca de su funcionamiento, el resultado de sus cálculos sale a la luz a través de una pantalla, impresora o altoparlante pero, salvo detalles como la velocidad del proceso, funciona exactamente igual independientemente de si su procesador está fabricado con bulbos, transistores, microchips de silicio, relevadores electromecánicos o espitas de agua: cualquier dispositivo que pueda conmutar entre dos estados puede ser la base material de un procesador; si la computadora fuese una caja negra cuyos componentes nos fueran ocultos, la manifestación externa sería exactamente la misma; el meollo del funcionamiento es independiente de la base material que le da sustento; lo importante es la relación, la interacción, la dinámica entre sus componentes. Un sistema puede reconocerse por propiedades de interacción de sus elementos que definen una relación entre ellos que los identifica y delimita del resto del universo.

*La mayoría de los fenómenos de la naturaleza son no-lineales en el mismo sentido en que la zoología es en su mayoría una zoología de no-elefantes.*

STANISLAW ULAM (1909-1984)

Los procesos definen y son definidos por una *dinámica*. Hay que distinguir la dinámica según sea *lineal* o no. Un proceso es *lineal* si el resultado de una acción es siempre proporcional a su causa: al doble de fuerza, doble de trabajo; al triple de fuerza, el triple de trabajo. Al factor constante que media entre la causa y el efecto se le llama *factor de proporcionalidad*. En los sistemas que poseen dinámicas lineales es válido el *principio de superposición*: la adición de soluciones da lugar a una nueva solución. Los sistemas que no cumplen con estas premisas se llaman *no-lineales*.

Se acepta que la mayoría de los procesos naturales son no-lineales. No obstante, el estudio de los procesos lineales ocupa una buena parte de los cursos de las instituciones de educación superior, en parte por su importancia metodológica y formativa pero, también, debido a que son más sencillos, y las matemáticas involucradas en su descripción y manipulación son esencialmente teorías acabadas. Sin embargo, los sistemas lineales son tan insuficientes para estudiar la naturaleza como la elefantología lo es para la zoología general: en la perspectiva lineal únicamente causas o fuerzas catastróficamente grandes pueden producir efectos catastróficos. En cambio, la no-linealidad de los mecanismos naturales permite que causas pequeñas produzcan efectos enormes y que causas enormes produzcan efectos despreciables o, incluso, que no engendren nada.

Un sistema es *complejo* si:

1. Está integrado por un *cierto* número de componentes *simples* que interactúan entre sí.

La teoría de los sistemas complejos estudia sistemas que tradicionalmente se habían dejado de lado porque no existían formalismos matemáticos adecuados;<sup>2</sup> aquellos cuyo número de componentes o

<sup>2</sup> El florecimiento reciente de las teorías matemáticas de sistemas dinámicos ha abierto nuevas rutas de estudio para llenar este hueco: las teorías de autómatas celulares, redes artificiales de neuronas, mapeos acoplados, gases en red, entre otras, ya han ganado su legitimidad como teorías formales y, acompañadas del desarrollo de métodos de optimización discreta como los algoritmos genéticos y los procesos de simulación de fraguado térmico, han permitido estudiar esos problemas antaño desatendidos.

grados de libertad excede las posibilidades de estudio *a la Newton*, en los cuales la dinámica viene dada por un conjunto pequeño y manejable de ecuaciones, y que no es lo suficientemente grande para caer en el rango de validez de la mecánica estadística. La brecha entre estos dos extremos incluye prácticamente la totalidad de los sistemas sociales y económicos y buena cantidad de los biológicos.

Por otra parte, se dice que los componentes de un sistema complejo son *simples* si su estado se puede describir con pocas variables. Esto depende, evidentemente, del nivel de descripción específico, y no se puede afirmar en términos absolutos: posiblemente en un nivel de complejidad inferior, un componente puede ser, a su vez, un sistema complejo en sí: una neurona puede ser un sistema complejo con sus componentes e interacciones perfectamente bien identificados, pero si el propósito de nuestro estudio es el sistema nervioso central, entonces es un componente simple de este último y se puede describir con pocas variables.

2. Su estado cambia al transcurrir el tiempo y el cambio es el resultado de una dinámica no-lineal que usualmente tiene dos partes: una local, que modifica el estado de los elementos como resultado de su interacción con los elementos vecinos y una dinámica global que obedece a las restricciones que pesan sobre el sistema y que provienen de la interacción de éste con el resto del universo.

No siempre los resultados de las dinámicas locales son compatibles con las restricciones globales. En tal caso se habla de *dinámicas en conflicto* o *dinámicas antagónicas*, lo que es una formalización matemática de la visión heraclitiana del mundo: el concepto antropocéntrico de "lucha" adquiere aquí una descripción precisa. Los estados de equilibrio a los que llegan los sistemas como resultado de esta confrontación se denominan *equilibrios dinámicos* o *equilibrios no-lineales*.

Los sistemas complejos exhiben ciertas manifestaciones gracias a las cuales es posible reconocerlos o caracterizarlos. Cada una de ellas es una huella de su riqueza fenomenológica. Aunque la naturaleza y extensión de este ensayo no nos permite detallarlas, nuestro esfuerzo quedaría incompleto sin, al menos, una descripción somera.

Los sistemas complejos tienen:

1. La propiedad de *frustración*. Cuando las interacciones entre los elementos son conflictivas, entonces no existe un estado del sistema que satisfaga simultáneamente todas las restricciones, y se dice que el sistema se halla en un *estado frustrado*. Por ejemplo, una ley o precepto legal en una sociedad (restricción global) entra en conflicto con

intereses de sus componentes y no permite que todas las actuaciones de nivel individual y de pequeño grupo (dinámicas locales) sean legales, entonces el estado del sistema (sociedad) será tal que no todos los componentes del sistema estén conformes, y decimos que el sistema globalmente se encuentra *frustrado*. No hay manera de evitarlo; en una sociedad ideal, lo único que se puede hacer es distribuir la frustración entre los diversos integrantes de la sociedad y hacerla rotativa.

2. Rupturas de simetría. Esto es, aparición de estructuras y patrones espacio-temporales en donde antes había únicamente homogeneidad. Esta propiedad es exclusiva de *sistemas abiertos* que intercambian masa, energía e información con su entorno. La ruptura de simetría viene acompañada del surgimiento de anisotropías y del nacimiento de direcciones preferenciales. Cuando en un problema de optimización los estados del sistema tienen muchos máximos equivalentes o cuasi equivalentes, entonces sucede que una solución es igual de buena que las demás, y se dice que el sistema exhibe una ruptura de simetría, pues la solución ya no posee una simetría completa del problema, se dice también que se tiene una solución *atracada*, en el sentido de que una vez que la evolución del sistema llega ahí, resulta imposible salir.<sup>3</sup>

3. Criticalidad autoorganizada (CAO). Estos sistemas evolucionan de manera natural y espontánea hacia un estado crítico en el cual una perturbación pequeña puede causar efectos de cualquier tamaño. De acuerdo con la teoría de la criticalidad autoorganizada, los mecanismos que producen hechos pequeños son los mismos que los que producen cambios catastróficos, y los sistemas nunca alcanzan un verdadero equilibrio sino que transitan de un estado metaestable al siguiente. Hay dos propiedades fundamentales de los sistemas con CAO: i] la incertidumbre provocada por dos condiciones iniciales distintas crece de manera polinomial; es decir, pierden memoria de su pasado, o capacidad de predicción futura, de manera más lenta que en el caos clásico (que lo hace de manera exponencial); a esta instancia del caos se le llama *caos débil*, y se dice que el sistema evoluciona en *el borde del caos*; ii] existen fluctuaciones de todos los tamaños que siguen reglas de distribución precisas. Estas fluctuaciones siguen la llamada *ley 1/f*. Es decir, el número de fluctuaciones de un tamaño dado tiene un

<sup>3</sup> *Atracado* es la versión castellana de la expresión inglesa *lock-in*, y existe una gran cantidad de ejemplos (que aparentemente desconocen los economistas neoliberales) que ilustran de manera contundente que un sistema dejado a su libre evolución no tiene por qué llegar a un equilibrio óptimo.

histograma que decae de manera hiperbólica: a muchas fluctuaciones pequeñas, un regular número de medianas y pocas catastróficamente grandes.

4. Fractalidad. Presentan estructuras discernibles en cualquier escala espacial y sus fluctuaciones; como consecuencia de la criticalidad autoorganizada, siguen reglas de distribución con auto-escalamiento. Todo esto se denomina *geometría fractal*.

5. Tienen muchos estados *cuantitativamente equivalentes* pero *cualitativamente distintos*. Esta propiedad está íntimamente relacionada con la de *frustración*. Un sistema frustrado nunca puede alcanzar el mínimo absoluto de sus contradicciones, y su estado final será un “mínimo metaestable” que dista mucho de ser único. De hecho, el paisaje de mínimos metaestables es un *fractal*, por lo que, en principio, se puede alcanzar una infinidad de mínimos metaestables; cada uno cuantitativamente equivalente a los demás, en el sentido de que la función que se desea minimizar toma el mismo valor en todos ellos, pero como corresponden a estados o configuraciones distintos del sistema, son cualitativamente equivalentes.

6. Generan *propiedades emergentes*. Ésta es quizá una de sus características más notables. Ya Aristóteles había dicho que “el todo es más que la suma de las partes”. Una lectura moderna de este enunciado es la definición de emergencia en un sistema no-lineal; las propiedades emergentes son el resultado de los procesos en paralelo que se llevan a cabo en un sistema complejo y su naturaleza es intrínsecamente colectiva; surgen en cada nivel sucesivo de complejidad y no se pueden deducir a partir de los componentes del sistema. Es importante insistir en que los procesos lineales no engendran emergencia, puesto que la adición de componentes únicamente resulta en sistemas más grandes; más de lo mismo.

## MANIFIESTO

*La historia de la humanidad es la historia de la lucha de clases.*

K. MARX (1818-1883) y F. ENGELS (1820-1895)

Nosotros estudiamos sistemas complejos y nos llamamos *estructuralistas dinámicos*. Lo “dinámico” de nuestra denominación proviene del hecho de que privilegiamos los procesos por encima de los objetos y

estudiamos las dinámicas que comportan interacciones no-lineales de los componentes de los sistemas.

La voz *estructural* se usa en muchas disciplinas; en cada una de ellas, el término tiene una acepción más o menos clara y posiblemente no quiera decir lo mismo que nosotros pretendemos. No obstante, en todos los casos mencionados, las escuelas estructuralistas se contraponen de algún modo a las *funcionalistas*<sup>4</sup> e *historicistas*.<sup>5</sup> Aunque el historicismo consigue narraciones elegantes y razonables, sus descripciones no constituyen tesis convincentes ni, mucho menos, explicaciones causales de algún suceso o fenómeno.

La historia no es una sucesión de anécdotas para ser relatadas; si algo podemos hacer para comprenderla, es buscar su dinámica y deducir sus estructuras. Por ello, para nosotros, el postulado marxista del epígrafe no sólo está vigente sino que puede tomarse como un primer principio para la construcción de una teoría de la historia como sistema complejo, lo que no es equivalente a la lectura popperiana del marxismo (véase la nota 1), pues no se pretende encontrar una herramienta de predicción.

<sup>4</sup> La raíz filosófica del funcionalismo es el teleologismo aristotélico: *las causas finales* justifican *a priori* todos los aspectos de la organización de los seres vivos, de las sociedades, de la economía, etc. Dentro de este supuesto surgen las explicaciones *ad hoc* de muchísimos procesos; la evolución biológica, por ejemplo, da lugar a las leyendas adaptacionistas según las cuales la historia de las especies está dirigida siempre por el designio superior de ser los más aptos, de manera que *todo* debe explicarse a partir de esa necesidad. Con humor, en la metáfora del doctor Pangloss, Stephen J. Gould expresa volterianamente los extremos del funcionalismo: “los seres humanos tenemos narices para poder llevar gafas”.

<sup>5</sup> El historicismo contingencista rechaza, de antemano, cualquier búsqueda de regularidad; en él, la historia únicamente puede concebirse como una larga concatenación de casualidades, de manera que no sólo es irrepetible sino inaprehensible en un cuerpo teórico coherente; para él, en consecuencia, no hay primeros principios que valgan y el devenir sólo puede describirse, narrarse una vez ocurrido, pero no explicarse. Nuestro estructuralismo, por el contrario, al concebir las sociedades como sistemas complejos y caracterizar sus atractores, puede analizarlas en su dinámica y explicar, para desencanto de Popper, sus regularidades, tendencias y patrones.

*Creer en una ley natural es creer que el universo es comprensible en última instancia, que las mismas fuerzas que determinan el destino de una galaxia también determinan la caída de una manzana en la tierra, que los mismos átomos que refractan la luz que pasa a través de un diamante también pueden formar el material de una célula viviente y que los mismos electrones que surgieron del big bang pueden dar lugar ahora al cerebro humano, a la mente y al alma.*

PHILIP ANDERSON

Así, la diferencia esencial entre estructuralismo y funcionalismo en biología es que el primero supone que existen leyes inteligibles en la naturaleza viva, que los procesos son describibles y, por tanto, matematizables, y que la explicación científica unifica numerosos fenómenos en apariencia dispares bajo un pequeño número de principios generales.

No pretendemos reducir todos los fenómenos a su expresión en términos de leyes “fundamentales” tal como las entienden los físicos tradicionales, pero sí proponemos a la física como la ciencia unificadora de los principios naturales. Los sistemas biológicos o sociales no dejan de ser sistemas físicos a pesar de tener características y metodologías propias, pero las fronteras que alguna vez se pensó que separaban la física, la química y la biología no existen ya. No hay leyes “químicas” o leyes “biológicas”, únicamente hay leyes naturales, y no existe ningún límite epistemológico que impida el futuro colapso de la frontera que artificialmente separa las ciencias naturales de las sociales.

Según el estructuralismo dinámico, los componentes de un sistema son motores de su propia evolución y están sujetos a leyes naturales con restricciones impuestas desde los niveles de organización inferiores y superiores. La cuestión estructural proviene de una concepción tipológica del universo, que no es ajena a la idea platónica de los arquetipos; dicho de otra manera, en este mundo existe un número finito y relativamente pequeño de posibles modos de organización de la materia, y no todas las realizaciones imaginables son posibles.

Un segundo, y fundamental, aspecto de nuestro estructuralismo es que los sistemas complejos absorben las contingencias históricas y en este sentido son *robustos*.

El caos no es azar. Numerosos autores cometen el error de identificarlos y se equivocan al usar ambos términos como sinónimos. La fuente de la confusión se encuentra en el hecho de que *algunas* mani-

festaciones del caos son estadísticamente parecidas al azar y surgen en sistemas con dinámicas determinísticas. Esta aparente paradoja ofende la intuición, pero le otorga al caos un estatus privilegiado como ente dialéctico; hasta hace poco tiempo se pensaba que si la naturaleza era impredecible, lo era por ser terriblemente complicada, y que el sueño de la predictibilidad de sus fenómenos se desvanecía debido a nuestra ignorancia, al ser incapaces de determinar el número necesario de parámetros que exige la mecánica newtoniana para ampliar nuestros horizontes de predictibilidad. El descubrimiento reciente del caos en sistemas determinísticos nos ha demostrado que existe una infinidad de sistemas cuyo comportamiento, a primera vista indistinguible del azar, es coherente y armónico. Es de la mayor importancia destacar que el caos tampoco debe confundirse con la indeterminabilidad de los sistemas y, por lo tanto, el argumento de que los sistemas complejos pueden describirse únicamente de manera estadística, como es usual hoy en día en la biología y las ciencias sociales, es un argumento sin sustento. El enfoque estadístico no genera conocimiento, los sistemas deben analizarse como sistemas dinámicos.

Una característica y un concepto notables son esenciales para este ensayo. La primera es *la sensibilidad de los sistemas caóticos con respecto a las condiciones iniciales*; el segundo es la noción de *atractor extraño*.

En el comienzo de un juego de billar se colocan las bolas en su posición inicial con la ayuda de un marco triangular de madera y luego se golpean con otra bola. El jugador más experimentado nunca logrará que las 15 bolas, luego del primer golpe, queden en la misma posición. Las diferencias imperceptibles en el golpe del taco, en las posiciones iniciales de las bolas y de la bola golpeadora, se amplifican y conducen a estados finales cada vez muy distintos. A este comportamiento se le llama *sensibilidad en las condiciones iniciales*.

En la teoría de los sistemas dinámicos, el comportamiento a largo plazo de un sistema se puede caracterizar geoméricamente mediante la noción de “atractor”. El conjunto de estados finales de tales sistemas puede ser: *i]* *un solo punto*, en cuyo caso se tiene un *estado estacionario*, *ii]* *ciclos cerrados*, que representan comportamientos periódicos y, finalmente, *iii]* *atractores toroidales*, que son ciertas combinaciones de ciclos. Recientemente se ha descubierto una nueva clase de atractores que corresponden a una dinámica en régimen caótico; estos atractores tienen geometría fractal en el sentido de que muestran detalles estructurales relevantes en todas las escalas de magnitud y se llaman *atractores extraños*.

El hecho de que en los sistemas complejos las fluctuaciones se amplifiquen debido a la sensibilidad en las condiciones iniciales se traduce en que el *horizonte de predictibilidad de los sistemas* se reduce. En efecto, un sistema en fase caótica pierde la memoria de sus estados anteriores y en ellos no es posible –pese a ser determinísticos– la predicción a largo plazo.

*Si Juárez no hubiera muerto...*

NOÉ FAJARDO

(danzonero cubano)

¿Cómo es posible que los sistemas complejos sean robustos ante las contingencias históricas si condiciones iniciales diferentes conducen a resultados radicalmente distintos? Una de las bases del pensamiento historicista es precisamente que ciertos accidentes (mutaciones, catástrofes, deriva génica) deciden la evolución de los sistemas y, puesto que impiden una explicación causal o una reducción a primeros principios, entonces no dejan otro recurso que la descripción narrativa. En el fondo, creer que la evolución de nuestro universo es un producto de accidentes históricos felices, irrepetibles y no-analizables es negar la verificabilidad de las teorías y la posibilidad de que la naturaleza sea describible y asequible al estudio científico.

El efecto de las contingencias desaparece debido al *mixing* del sistema dinámico y a la pérdida de memoria de los estados anteriores; sin embargo, si un suceso ocurre o deja de ocurrir, a largo plazo va a influir muy poco en el resultado final, puesto que las posibles trayectorias que el sistema puede seguir ocupan un subconjunto relativamente pequeño dentro del espacio de todas las posibles realizaciones. Ese subconjunto es precisamente el atractor extraño. Los accidentes históricos van a provocar porvenires distintos, pero siempre obligados a estar sobre el mismo atractor extraño: futuros disímiles pero bajo restricciones tan fuertes que nos van a permitir encontrar regularidades y semejanzas notables.

## COLOFÓN

*Quando sometemos a la consideración del pensamiento la naturaleza o la historia humana, o nuestra propia actividad espiritual, se nos muestra de pronto la estampa de un infinito entrelazamiento de conexiones e interacciones, en el cual nada permanece siendo lo que era, ni como era ni donde era, sino que todo se mueve, se transforma, deviene y perece...*

F. ENGELS

Concebir una naturaleza interconectada y sujeta a principios generales, en un estado de cambio permanente, cuyos sistemas muestran múltiples estados cuantitativamente equivalentes pero cualitativamente distintos, y en la cual el motor de las transformaciones, la fuente de la complejidad, es el producto de dinámicas antagónicas, en donde los fenómenos azarosos no son más que instancias del caos, es decir, de un orden dinámico subyacente, ha sido la tarea de destacados pensadores, desde Heráclito hasta Engels, y de sus herederos intelectuales. A ese esfuerzo sumamos el nuestro.

Estas ideas son nuestra propuesta, están sustentadas en resultados fuertes y bien establecidos de la física y las matemáticas contemporáneas. Y nuestra insistencia en hacer hincapié en la parte dinámica de los procesos y relegar a segundo plano los detalles de la composición material de los objetos que constituyen los sistemas tiende el puente para que se busquen sus contrapartes en las ciencias naturales y sociales.

El trabajo por hacer es ingente, pero creemos que en estos tiempos de crisis y desencanto, la opción de los abogados de los derechos ilimitados del individuo y del mercado, como única posibilidad “práctica” de organización social –una vez derrotada la opción del estado omnipotente y reglamentador– es un engaño, pues se basa en una dicotomía reduccionista e inválida desde el punto de vista de la ciencia, e inaceptable desde el de la ética.

En la situación actual de un país como México, la ciencia tiene mucho más que hacer que rendirse y ceder ante las modas impuestas por la competencia y el sentido individual de la propiedad; se abre ahora la posibilidad de buscar formas novedosas e imaginativas de organización de la comunidad de científicos como entes académicos y sociales que promuevan la educación y el acercamiento con los estudiosos de las ciencias sociales. de manera que nuestras demandas y propuestas sean más efectivas y racionales.

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 piramidalmente 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.

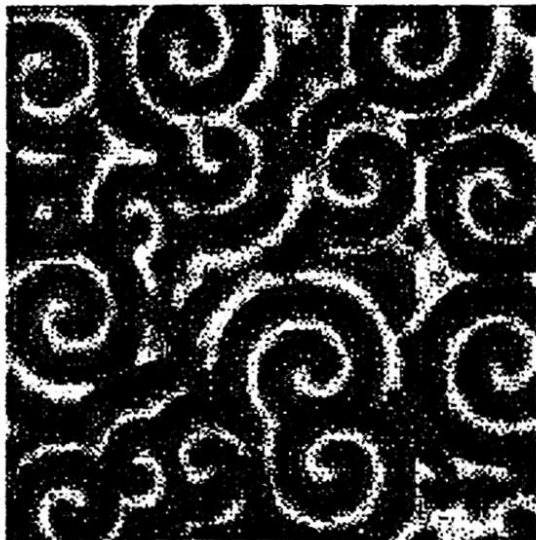


FIGURA 1. Ondas en espiral. Estas estructuras espaciales surgen de manera autoorganizada en una diversidad de sistemas complejos, que van desde las reacciones químicas, procesos de agregación social, actividad eléctrica en el corazón o dinámica de medios granulares.

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.