



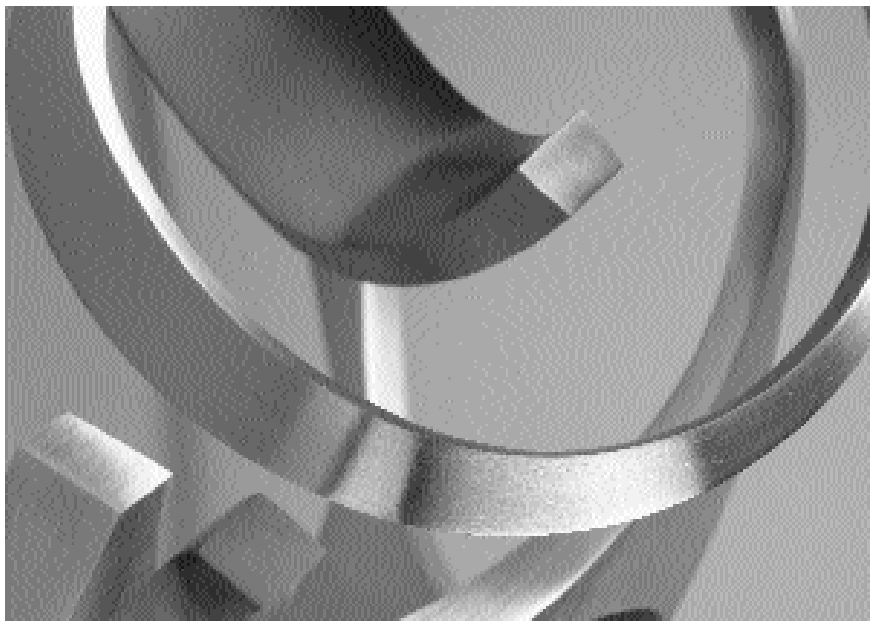
Desde hace un par de décadas, la física enfrenta una transformación no menos que formidable. En un torbellino de cambios y discusiones, esta disciplina ha visto modificada no sólo su forma de trabajo —resultado de la apropiación de un sinnúmero de nuevas tecnologías— sino, más en general, su forma de ver, interpretar y explorar la naturaleza. Esto se debe, en gran medida, al desarrollo de una nueva área de estudios, la de los sistemas complejos, que representa un conjunto de retos sin precedentes para la ciencia en general y primordialmente para la física.

Como todo gran reto, resulta poco probable que los productos del estudio de los sistemas complejos se limiten a una sola disciplina, sin derramarse a otras áreas. Dado su carácter altamente interdisciplinario, resulta inequívoco que con el paso del tiempo los logros —y fracasos— de esta nueva rama impactarán de forma significativa la manera de hacer y de relacionarse con la ciencia en su totalidad. Los sistemas complejos llegaron para quedarse y también para revolucionar.

Aunque para muchos sea relativamente fácil pensar que su estudio es una suerte de moda, algo pasajero que se disipará al cabo de algunos años, los hechos desmienten tal suposición. Existe gran cantidad de evidencia apuntando en dirección contraria; es decir, hacia la idea de que los frutos de esta nueva área formarán una parte importante del lenguaje de la física del futuro. En otras palabras, la noción finalista de que lo tradicional basta para dar lógica a la naturaleza puede ser la que esté —afortunadamente, desde mi perspectiva— en peligro de extinción. El exitoso surgimiento de áreas interdisciplinarias, por ejemplo las llamadas econofísica y sociofísica, es importante prueba de ello. Otra es el creciente número tanto de publicaciones especializadas como de artículos científicos sobre este tema; tan sólo de 1997 a 2003, el número de artículos del servidor de Los Álamos con el término *complex systems* pasó de 17 a 66, aunado al lanzamiento de revistas especializadas en problemas relacionados con este tipo de sistemas. Pero más allá de tendencias particulares, las crecientes de-

La metafísica de lo complejo

Juan Pablo Pardo Guerra



mandas para la comprensión de sistemas con dinámicas enmarañadas, que en ocasiones requieren metodologías de análisis poco ortodoxas, probablemente será lo que consolide el lugar de los sistemas complejos entre la comunidad científica, pues es en este tipo de estudios donde los resultados son más prometedores y, sobre todo, más prácticos.

Lo complejo y lo complicado

Antes de explorar la relevancia de los sistemas complejos es necesario entender a qué nos referimos por estas entidades. En este punto resulta esencial distinguir lo complejo de lo complicado, pues es frecuente confundir ambos conceptos.

La física desde sus inicios ha tratado con sistemas complicados. De una u otra forma, la complicación de algo no limita la posibilidad de su estudio, como lo muestra el desarrollo de la teoría cinética en el siglo XIX y de la mecánica cuántica desde principios del XX. En realidad, lo complicado no

es más que una forma de catalogar sistemas definidos por muchos componentes, que hacen de los cálculos una tarea interminable. Por ejemplo, al estar conformado por un gran número de parámetros microscópicos —un número que típicamente es del orden del de Avogadro—, un gas es un sistema sumamente complicado; los cálculos necesarios para encontrar su evolución precisa son, en el mejor de los casos, descomunales. Sin embargo, estudiar el comportamiento estadístico de este tipo de sistemas es relativamente inmediato, ya sea a través de la mecánica estadística o bien de la termodinámica clásica. Los físicos son, como resulta claro tras una breve revisión de un libro de texto estándar, artesanos de la aproximación, pues convierten algo sumamente complicado —un billón de billones de parámetros correspondientes a los momentos y posiciones de las partículas de un gas— en algo sumamente manejable —temperatura, presión, volumen, densidad y energía interna.

En contraste con lo complicado, los sistemas complejos tienen un comportamiento mucho más difícil de aprehender. En el año 2003, Johnson, Jefferies y Hui caracterizaron estas entidades por medio de una larga lista de propiedades, entre las que destacan la retroalimentación, la inestabilidad, muchos agentes interactuantes, adaptación, evolución y sistemas abiertos. Adicionalmente, Philip Anderson agrega la emergencia —comportamientos macroscópicos que no son lógicamente consecuentes de las leyes microscópicas— como la característica primordial de la cual surge la complejidad. Es decir, los sistemas complejos son entidades mucho más afines en términos conceptuales a una comunidad biológica que forma parte de un ecosistema que a un gas ideal en un contenedor hermético y térmicamente aislado. Los sistemas complejos son, en efecto, un nuevo paradigma para la física que sustituye a la vieja concepción de lo mecanizado, lo lineal y lo estadísticamente estacionario.

Peró, ¿cómo afectan estas cualidades la metodología de la física cuando ésta se adentra en el estudio de los sistemas complejos? Para entender esto es necesario revisar, a *grosso modo*, la forma en la que los físicos ven e interpretan la naturaleza.

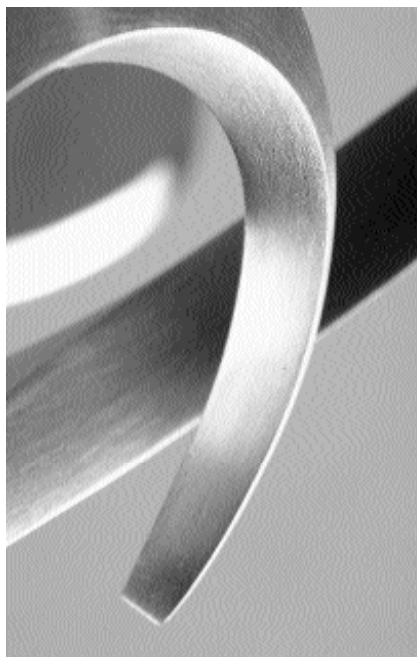
La metafísica de lo complicado

En el prefacio a la edición francesa de los *Principia Philosophiae* de 1644, René Descartes estableció una jerarquía que, a su parecer, define la estructura del conocimiento humano. “Toda la filosofía es [...] como un árbol, donde las raíces son la metafísica, el tronco la física, y las ramas que surgen de él son todas las otras ciencias”. Después

de más de tres siglos y medio de su publicación, estas palabras aún no han perdido del todo su fuerza. La obra de Thomas Kuhn y de Paul Feyerabend permiten retomar esta idea cartesiana del conocimiento y hacerla un poco más general, sobre todo actual. Si consideramos la ciencia como una actividad sustentada por una matriz social, es decir, por un conjunto de actitudes, nociones y estructuras de corte social, entonces la metafísica bien puede catalogarse como una parte íntegra de esta matriz. En terminología de Kuhn, es un componente esencial del paradigma sobre el cual se sustenta la ciencia, sea cual fuere, desde las concepciones aristotélicas hasta las interpretaciones menos inmediatas de la física cuántica al estilo de Copenhague.

La ciencia moderna, en particular la física, en gran medida depende de un conjunto de principios metafísicos, por lo que es importante identificarlos con precisión. De cierta forma, son una serie de compromisos ontológicos que han moldeado el camino de los programas de investigación científica y que forman parte de la cosmovisión de la ciencia moderna. Entenderlos representa conocer una porción probablemente pequeña pero apreciable de lo que constituye la ciencia en nuestros días.

Cabe la posibilidad de que esta metafísica no sea un conjunto pequeño de enunciados sino más bien una lista interminable. Sin embargo, y por mero pragmatismo, podemos identificar entre los elementos de esta lista a cuatro principios rectores que describen de manera aproximada los planteamientos sobre los que descansan muchas de las construcciones de la física moderna. Estos son el principio de Ockham-Newton, el de Ga-



lileo, el de los estados y el de causalidad.

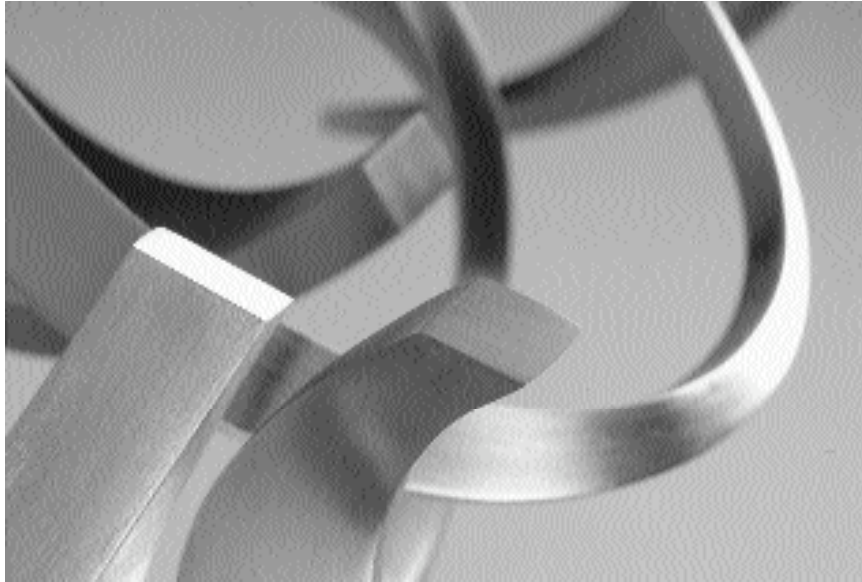
El principio de Ockham-Newton, uno de los fundamentos más claros de la ciencia moderna, es el precepto de que el camino de lo simple es lo más adecuado en cualquier razonamiento. Aunque esta idea tiene sus orígenes en tiempos anteriores a los de Guillermo de Ockham (1280-1347), generalmente es atribuida a este filósofo medieval en la forma de la Navaja de Ockham. Posteriormente, Isaac Newton incorporó explícitamente una idea similar en sus reglas para filosofar, “no deben admitirse más causas de las cosas naturales que aquellas que sean verdaderas y suficientes para explicar sus fenómenos [...] Por ello, en tanto sea posible, hay que asignar las mismas causas a los efectos naturales del mismo género”.

El principio de Galileo representa uno de los puntos claves en la evolución de la ciencia, la matematización de las explicaciones de los fenómenos naturales. La concreción de esto

se debe en gran medida al trabajo de Galileo Galilei, quien en 1623 acuñó la famosa frase “el libro de la naturaleza [...] está escrito en caracteres matemáticos”. Pasar de lo retórico a una representación matemática, estrictamente formal, fue uno de los hitos que permitieron el desarrollo de un lenguaje común para la comunidad científica, facilitando así la articulación de las actividades de investigación. Sin embargo, abrazar la matemática como el lenguaje propio de la ciencia no es algo evidente. Implica aceptar que la naturaleza tiene un lenguaje similar al de la ciencia o, en el peor de los casos, uno que puede ser traducido en términos matemáticos sin pérdidas considerables.

Si la naturaleza puede ser representada con un lenguaje matemático, es necesario saber qué es lo que se va a representar. En general, esto corresponde a los estados físicos, con los cuales se pretende describir las características de un sistema por medio de un conjunto finito de variables, lo que corresponde al principio de los estados. Por ejemplo, el estado de un gas se representa por medio del conjunto de posiciones y momentos de sus partículas, junto con la descripción de todas las interacciones que puede tener con su entorno —las fuerzas y los campos externos.

Dado un estado de un sistema físico, su evolución se determina como el efecto de una cadena causal de otros estados, el principio de causalidad. La relación se establece por un conjunto de leyes que se aplican de igual manera a todos los componentes del sistema —leyes universales. En otras palabras, una vez definido el estado de un sistema, existe un camino o, más en general, un conjunto de caminos con una estadística bien delimitada,



que nos describen la evolución del sistema.

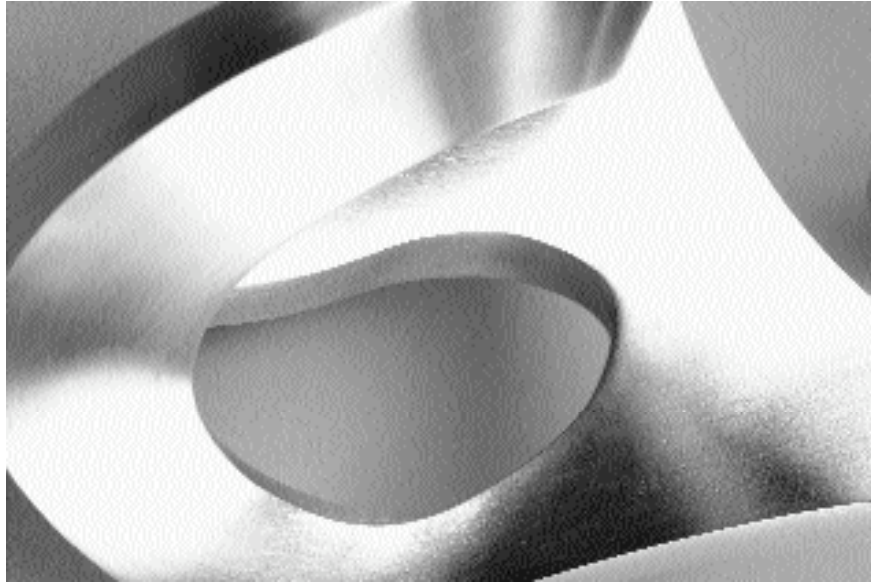
Lo complejo simplemente es diferente

¿En qué sentido son insuficientes esos cuatro principios para el análisis de los sistemas complejos? Intuitivamente, y partiendo de la idea de lo que constituye un sistema complejo, resulta medianamente claro que los principios que sustenta la física moderna son insuficientes. Basta con tomar su definición y aplicarla a un caso particular para percata rse del contraste entre la metodología tradicional de la física y las nuevas demandas a resolver. Con el fin de observar esto con mayor cuidado, tomemos uno de los casos más estudiados en los últimos años. Así, y por meras razones argumentativas, utilizaremos un mercado financiero como parámetro de comparación. Aunque no es inmediato, muchos de los argumentos utilizados para este sistema se pueden exportar a otros casos, desde la dinámica del tráfico y las transiciones de fase, hasta los estudios sobre el origen de la vida.

Los mercados financieros no son simples. La evidencia más reciente sobre su comportamiento señala que a pesar de ser entidades que se rigen por un pequeño número de reglas, muestran dinámicas que no siempre siguen patrones regulares, mucho menos patrones simples. Los trabajos de Robert Shiller revelan que no sólo son sistemas abiertos —lo que es natural, al estar inscritos en un sistema económico mayor—, sino que su comportamiento se rige fuertemente por influencias culturales, sociales y, como los llamó Alan Greenspan, conductas exuberantemente irracionales. Hasta ahora, fenómenos derivados de esta complejidad ambiental —como, por ejemplo, las caídas estrepitosas de las bolsas de valores— se han comparado con otros procesos físicos igualmente complejos, tales como las transiciones de fase. Adicionalmente, modelos evolutivos como los desarrollados por investigadores del Instituto Santa Fe parecen describir mejor la dinámica regular del mercado que los que parten de la física clásica y, hasta cierto punto, reduccionista.

Los mercados financieros no hablan matemáticas. La evidencia sobre el comportamiento de inversionistas muestra que las desviaciones de las estrategias racionales —de alguna forma, provenientes de una lógica normal— son frecuentes y de hecho constituyen una parte importante de la dinámica del sistema. Es muy probable que modelar esos comportamientos irracionales esté fuera del alcance de las técnicas tradicionales, y que se requiera utilizar otros métodos —como simulaciones computacionales y algoritmos genéticos— que aún no se han explorado plenamente, a pesar de que muchos investigadores recurren a ellos. Siguiendo la misma línea, los métodos experimentales para cuantificar y cualificar el comportamiento de inversionistas están lejos de consolidarse y demandan un gran desarrollo teórico.

No puede definirse el estado de un mercado financiero, porque al estar constituido por el comportamiento humano, sería necesario definir su estado antes que el del mercado. Desafortunadamente, nuestra compren-



sión de la conciencia y, en general, del comportamiento es todavía inadecuada como para poder describir el estado de un inversionista en particular. Así, una descripción por medio de estados es, en el mejor de los casos, improbable. No importa que tan cerca estemos de determinar el estado de un mercado —es decir, las acciones en mano de todos los agentes en un tiempo dado—, esa descripción no puede considerarse válida, ya que no hay nada en ella que proporcione indicios sobre el estado siguiente.

La evolución de un mercado es multifactorial. El de valores, además de verse afectado por su dinámica interna, también lo es por la información del exterior, que contribuye notablemente en las alzas o caídas de las acciones. En el mejor de los casos podemos hablar de tendencias de corto plazo, pero tratar de encontrar leyes que describan la evolución del sistema para periodos largos es sencillamente inimaginable. La retroalimentación de información, la capacidad de adaptación de los integrantes y la imposibilidad de ver lo que hay en la ca-

beza de cada uno de los inversionistas es una muralla que impide el avance de cualquier intento por construir una descripción causal —en el sentido de un determinismo estadístico— de los sistemas económicos en general.

Hacia una metafísica de la complejidad

¿Cómo podemos ampliar nuestra visión del mundo para dar cabida al estudio de los sistemas complejos? Es claro que muchas de las ideas que heredamos de la física, tal como las conocemos, aún tienen un valor indiscutible. Sin embargo, otras requieren revisarse si queremos construir una física de la complejidad. Entre las posibilidades que conviene explorar, está la navaja de Ockham generalizada.

Más allá de viajar por los caminos más sencillos —lo que esto quiere decir— la física del futuro tiene el enorme reto de generar una noción adecuada de lo que constituye la simplicidad. Las herramientas tradicionales, como la minimización de energía en sistemas mecánicos o la maximización de entropía en sistemas esta-

dísticos, pueden no ser la descripción natural de muchos procesos, por lo cual añadir otras causas se convierte en una posibilidad valiosa. En este sentido, para evitar la proliferación de una miríada de explicaciones *ad hoc* —en el extremo, una para cada sistema complejo—, es necesario enfrentar de lleno los problemas teóricos planteados por la autoorganización y por los fenómenos emergentes, para obtener una descripción sencilla pero medianamente general de los mismos.

Otro enorme reto es la construcción de una definición adecuada de complejidad. En la actualidad, existen un gran número de formas de percibir la complejidad, desde la entropía simbólica de Shannon hasta la complejidad efectiva de Gell-Man. Cada una responde a distintas necesidades —de la búsqueda de predictibilidad a la de estructura. Por esto, el desarrollo de marcos teóricos más sólidos y extensos probablemente permitiría una mejor delimitación de las distintas ideas sobre lo que es la complejidad. Además, nos facultaría para ver la importancia de factores no estudia-

dos tan frecuentemente, como es el caso de la estructura informacional en sistemas económicos —sistemas complejos—, o en general, lo que hace al todo más que la suma de sus partes.

No es fuera de lo ordinario encontrarse con sistemas complejos para los cuales las soluciones analíticas sencillamente no existen. Una parte importante del cambio de paradigma de lo tradicional hacia una física de lo complejo será el apropiarse de nuevas tecnologías como herramientas de análisis. Por ejemplo, simulaciones computacionales de muchos agentes, algoritmos genéticos, autómatas celulares y similares.

Para finalizar

La articulación de una nueva visión del mundo nunca es algo trivial. En todos los casos requiere ingenio, perspicacia y, sobre todo, un momento en la historia que se preste para una re-

volución. Ingenio y perspicacia tenemos en todo el mundo. Y el momento, en mi opinión, lo estamos viviendo.

Los problemas de nuestros días no son los mismos que los que enfrentaban los científicos hace cuatro siglos y que sirvieron de cuna para el desarrollo de la ciencia tal y como la conocemos.

En la actualidad, las nuevas agendas políticas basadas en los ideales de desarrollo sustentable, participación comunitaria, pluralidad y diálogo intercultural nos demandan generar nuevos paradigmas coherentes con los problemas que enfrentan nuestras sociedades ya de por sí polarizadas. Entre estos paradigmas, una ciencia de la complejidad es un imperativo, aunque ello implique ponerle un rostro enteramente distinto al actual. Sin embargo, el desarrollo de esta ciencia no es algo inmediato. Requiere que nos formulemos preguntas sumamente profundas sobre el mundo a cons-

truir. ¿Qué es lo que deseamos? ¿Cómo queremos obtenerlo? ¿Para quiénes es el futuro?

Las respuestas a éstas y otras muchas preguntas deben servir de base para una física de lo complejo. Así como Copérnico le quitó al ser humano el centro del universo, lo complejo debe quitarnos la idea de una y sólo una verdad, de una y sólo una totalidad. Y así como los árboles crecen del suelo, la nueva ciencia de lo complejo debe comenzar desde la metafísica por los cuestionamientos más básicos sobre la naturaleza, poniendo en el banquillo del acusado al reduccionismo, que hoy muestra ser más un lastre que una conveniencia metodológica.

El futuro se muestra brillante y complejo. Es momento de apreciar el panorama, de ver el bosque, y de comenzar la edificación de las raíces de lo que podrá convertirse en un frondoso elemento del conocimiento humano. ☸



Juan Pablo Pardo Guerra
Facultad de Ciencias,
Universidad Nacional Autónoma de México.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Johnson, N., P. Jefferies y P. K. Hui. 2003. *Financial market complexity*. Oxford University Press, Oxford.
- Anderson, P. 1994. *Physics: the opening to complexity*, en www.santafe.edu
- Kuhn, T. 1999. *La estructura de las revoluciones científicas*. Fondo de Cultura Económica, México.
- Feyerabend, P. 2000. *Tratado contra el método*. Tecnos, Madrid.

- Heidegger, M. 2001. *Hitos*. Alianza Editorial, Madrid.
- Newton, I. 2002. *Principios matemáticos de la filosofía natural*. Alianza Editorial, Madrid.
- Shiller, R. 2002. *Exuberancia irracional*. Océano, Madrid.

IMÁGENES

- David Guzmán (escultura) y Patricia Madrigal (fotografía). *Daduk el equilibrista*, 2005.