

Física, causalidad, determinismo, azar y caos



RAFAEL PÉREZ PASCUAL

Desde la antigüedad se ha pensado en encontrar causas de los fenómenos y acontecimientos que nos rodean. Los debates al respecto han influido de muy diversas formas en el pensamiento, en particular en el de filósofos y científicos.

Uno de los modos de explicar las cosas o los acontecimientos es el de las causas finales o finalistas. Por ejemplo, si digo que los objetos caen cuando los dejamos libres porque su estado natural es el estar en el suelo o ligarse íntimamente con la tierra, estoy adoptando una explicación finalista, estoy buscando una causa en el fin del movimiento de ese objeto: la causa por la que las piedras caen está en la búsqueda de su estado natural junto a la tierra.

Aristóteles nos dice en su *Física*, libro segundo, capítulo ocho:

...la acción por la búsqueda de un fin está presente en las cosas que vienen a ser y son por naturaleza.

Es más, cuando una serie llega a completarse, todos los pasos precedentes van en busca de ello. Así es en la acción inteligente, como en la naturaleza; y como en la naturaleza, lo es en cada acción, si nada interfiere. Ahora la acción inteligente lo es en la búsqueda de un fin; entonces en la naturaleza de las cosas también es así.

Es claro entonces que la naturaleza es una causa, una causa que opera en función de un propósito.

Sócrates le dice a Cebes en los *Diálogos* de Platón:

...si una persona me dice que el florecer de los colores, de la forma o de cualquier otra cosa similar es la fuente de la belleza... yo sostengo, y de eso estoy seguro en mi propia mente, que nada hace a algo bello excepto la presencia y participación de la belleza en sí... es por la belleza que las cosas bellas se hacen bellas... y es sólo por la grandeza que las cosas grandes se hacen grandes y mayor se hace lo grande, y es por la pequeñez que lo pequeño se hace menos.

Así, las concepciones finalistas se establecieron y dominaron, en gran medida, el pensamiento.

Otra forma de observar la realidad, sin dejar de tener una postura causal, consiste en la búsqueda de secuencias de causa y efecto, esto es la explicación de algún fenómeno en una causa que lo antecede y determina. El color de los reactivos en el tubo de ensayo se torna rojo, porque la reacción química produce una sustancia que absorbe la luz de todos los colores excepto la roja.

Según Hume el conocimiento, para ser científico, debe establecer la causa de las cosas y de acuerdo con Bacon la filosofía natural debe dividirse en dos partes: la física, que inquiriere sobre las causas materiales y eficientes, y la metafísica, que examina las causas formales y finales.

La causalidad, de una forma u otra, está presente en el pensamiento científico. Sin embargo, como nos señala Bacon, los científicos tienden a desechar las causas finalistas, ya sean éstas de origen teológico, como lo son para Aristóteles, o parte de la lógica, como lo resultan para Platón.

El pensamiento científico ha buscado causas y efectos, pero no podemos simplificar al grado de identificar lo científico con lo causal, ni siquiera desde la perspectiva de una causalidad no finalista. Podemos preguntarnos siempre por la causa de la causa, y no hay duda de que, si bien esto ha inspirado a muchos, no por ello constituye el paradigma último de la ciencia.

En relación con Galileo, Salvati ya señalaba en el diálogo de *Las dos nuevas ciencias*:

El presente no parece ser el tiempo adecuado para investigar las causas de la aceleración del movimiento natural sobre las que se han expresado numerosos filósofos... Ahora, todas esas fantasías, y otras también, podrían ser examinadas, pero en realidad no vale la pena. En el presente el propósito de nuestro autor (Galileo) es únicamente el de investigar y demostrar algunas de las propiedades del movimiento acelerado —cualquiera que pueda ser la causa de esa aceleración— entendiendo

por tal aquel en el que el *momentum* de su velocidad se incrementa después de partir del reposo en proporción simple al tiempo...; y si encontramos que las propiedades que demostraremos se realizan en los cuerpos en caída libre y en los acelerados, concluiremos que la definición asumida incluye al movimiento de los cuerpos que caen y que su velocidad se incrementará con el tiempo y la duración de su movimiento.

Varias décadas después, en el prefacio de los *Principia*, Newton nos dice:



...la mecánica racional será la ciencia de los movimientos resultantes de cualquier fuerza, y de las fuerzas requeridas para producir cualquier movimiento, ambas cosas propuestas y demostradas con precisión... Ofrezco este trabajo como los principios matemáticos de la filosofía, ya que la parte principal de la filosofía parece consistir de esto —a partir de los fenómenos de los movimientos investigar las fuerzas de la naturaleza, y partiendo de esas fuerzas demostrar los otros fenómenos. Las proposiciones generales de los libros primero y segundo se dirigen a este propósito.

Más adelante, en la definición ocho, señala:

...aquí me propongo sólo dar una noción matemática de esas fuerzas, sin considerar sus asientos o causas físicas... el lector no debe imaginar que con esas palabras pretendo definir la clase o la forma de cualquier acción, las causas o las razones físicas de ello, o que yo les atribuyo fuerza, en un sentido cierto y físico, a ciertos centros —que sólo son puntos matemáticos...

Finalmente Newton establece sus “Reglas para razonar en filosofía” en el libro tercero de los *Principia*:

Regla 1. No debemos admitir más causas de las cosas naturales que aquellas que, para explicar su apariencia (su fenomenología, diríamos), sean ciertas y suficientes.

Regla 2. A los mismos efectos naturales debemos, hasta donde sea posible, asignar las mismas causas.

Regla 3. Las propiedades de los cuerpos que no admitan intensificación o reducción de grado (se refiere a cosas como la inercia) y que se encuentren en todos los cuerpos al alcance de nuestros experimentos se deben considerar como propiedades universales para cualquier cuerpo.

Regla 4. En filosofía experimental debemos ver aquellas proposiciones inferidas por inducción general a partir de los fenómenos como precisas o casi precisas, a pesar de cualquier hipótesis en contrario que pueda ser imaginada, y ello hasta que ocurra otro fenómeno por medio del cual podamos hacerlas más precisas o concebirlas como susceptibles de excepciones.

Así se va llegando a un paradigma científico que, si bien no niega la causalidad, no cifra en el establecimiento de causas, y mucho menos en el de causas últimas o finalistas, su principal propósito. La mecánica newtoniana no se propone buscar o establecer la causa de la inercia y entiende a esta última como una propiedad universal de los cuerpos establecida por inducción general a partir de la observación y experimentación. Esa noción y otras hipótesis relativas a propiedades universales similares —las famosas segunda y tercera leyes de Newton— nos permiten deducir los fenómenos del movimiento de los cuerpos a partir de las fuerzas y construir teorías generales de éstas —como la Ley de Gravitación Universal del propio Newton— con base en las particularidades de algunos fenómenos.

Con Newton y su mecánica la filosofía natural se hace física y la búsqueda de causas últimas se convierte en filosofía o metafísica. Esto no quiere decir que para la física los fenómenos no tengan causas, pero sí que su examen de la concatenación de causas y efectos termina al establecerse teorías generales, como la mecánica o la electrodinámica, donde pierde sentido físico continuar con el causalismo; mediante ellas, en cambio, resulta posible alcanzar un entendimiento general, preciso y sustentado en la experimentación, para contemplar, entender y extender toda la fenomenología pertinente. Por eso Spinoza se aventura a afirmar que “...la naturaleza no persigue un fin: todas las causas finales no son otra cosa que ficciones humanas”. También se lamenta de la existencia de aquellos que “...no cesan en preguntar la causa de las causas, hasta que finalmente caen en la voluntad de Dios, refugio de la ignorancia”.

Con el advenimiento de la ciencia moderna, fundada en el paradigma de la mecánica newtoniana, pareciera que se pierde algo —ya Virgilio decía: “Feliz aquel que posea la habilidad de entender de la naturaleza sus ocultas causas”—. En realidad se gana, puesto que esa ciencia nos ha permitido, a fin de cuentas, adentrarnos mucho más en el conocimiento de la

naturaleza que mediante aquellas fantasías —en palabras de Galileo— de las que, por ahora, no vale la pena ocuparse.

La mecánica newtoniana nos trajo, como si pretendiera compensar las aparentes pérdidas, la afirmación o consolidación de otra gran figura del pensamiento: el determinismo. El hecho de que la mecánica permita, a partir de sus principios generales y universales, deducir cuantitativa y matemáticamente el movimiento futuro de los cuerpos con base únicamente en el conocimiento de su estado en un instante cualquiera del tiempo, nos induce a pensar en la determinación de los fenómenos y en su posible deducción racional, tal como lo prevé la famosa afirmación de Laplace:

Una inteligencia que, en cierto instante del tiempo, conociera las fuerzas que animan a la naturaleza y la situación de todos los elementos que en ese momento la integran, y si fuera además capaz de someter todos esos datos a análisis, comprendiendo en la misma fórmula los movimientos de los más grandes cuerpos del universo, y aquellos de los más diminutos átomos: nada le sería incierto y tanto el futuro como el pasado se harían presentes ante sus ojos.

Notemos que causalidad y determinismo son conceptos muy distintos, aunque relacionados en formas complejas. Puedo imaginar una causalidad no determinista: por ejemplo, una misma causa puede, intervenga o no el azar, producir efectos diversos. Puedo imaginar también que esa situación de los elementos que constituyen el universo en un determinado instante, aunque en efecto determine todo su futuro y su pasado, no obedezca a causa alguna. Es posible, en fin, realizar muchos otros ejercicios, pero lo cierto es que el determinismo newtoniano penetró en la ciencia y se impuso como paradigma.

Ahora bien, el verdadero debate se impone, en este contexto, entre el determinismo laplaciano y el concepto de azar e incluso el del libre albedrío. ¿La participación del azar en la naturaleza es real o las cosas que nos parecen azarosas poseen tal apariencia únicamente debido a nuestra ignorancia? Con la mecánica puedo deducir el movimiento de los astros con gran precisión, pero ello se debe a que conozco las leyes de su movimiento y he podido establecer sus posiciones y velocidades con gran exactitud por medio de la observación astronómica. Cuando se trata, en cambio, de las moléculas de un litro de un gas, sólo puedo hablar de probabilidades, de irreversibilidad, de entropía, ya por la intervención de la casualidad, ya por el papel del azar, ya por la ignorancia e incapacidad de conocer el estado de cada una de esas moléculas y de efectuar el análisis reclamado por Laplace en este caso.

Durante siglos la fórmula newtoniana nos ha orillado a pensar en el determinismo y a excluir el azar y la casualidad. La propia revisión de los conceptos newtonianos a que condujeron, al principio de este siglo, la relatividad y la mecánica cuántica, reafirmó en realidad las ideas newtonianas si se va al fondo de ellas.

Cuando Einstein establece el principio de relatividad y se ve obligado a modificar las leyes de Newton en función de la pertinencia de las de Maxwell, no hace otra cosa sino aplicar, como el gran genio que era, las reglas de la filosofía natural establecidas por el descubridor de las leyes de gravedad casi trescientos años antes.

La mecánica cuántica introduce elementos polémicos más profundos en torno a la cuestión del determinismo y de la participación del azar en la naturaleza. En ella no podemos ya hablar del estado preciso de los objetos naturales. Está



intimamente establecida en su formulación la imposibilidad de conocer con exactitud propiedades de un objeto como su posición y su velocidad, pues únicamente podemos concebir distribuciones de probabilidad de los valores de dichas propiedades.

Esto no significa que con la mecánica cuántica dejemos atrás el determinismo, ya que si bien sólo podemos hablar de distribuciones o —para ser un poco más precisos— amplitudes de probabilidad, para calcular estas últimas resulta perfectamente posible establecer las ecuaciones necesarias y, así, determinarlas en el tiempo aunque, por su propia naturaleza probabilista, no establezcan con precisión newtoniana el estado de un objeto —incluso tal concepto de estado pierde sentido al ser inherente a la mecánica cuántica la idea probabilista.

Si bien es claro que la mecánica cuántica no desecha el determinismo, sí pone en duda los principios causales y asigna a la casualidad o al azar un papel importante. Esto con beneplácito de muchos y molestia de otros como Einstein,

quien expresa su opinión al respecto con la célebre afirmación de que Dios no juega a los dados. También hay quienes encuentran en la mecánica cuántica, en su determinismo no estrictamente causal y, en especial, en el llamado colapso de la función de onda, una solución al problema del libre albedrío en el contexto de la ciencia determinista. (Si el buen Galileo calificaba de fantasías de las que no valía la pena preocuparse a los esfuerzos de búsqueda causal, podemos imaginar los calificativos que asestaría ahora a estas ideas.)

Por otro lado no debemos pensar que los debates o interpretaciones encontradas a que conduce la mecánica cuántica le restan valor científico, pues se trata de una teoría bien fundada experimentalmente, esclarece un sinnúmero de fenómenos físicos y sus predicciones han resultado congruentes con multitud de hechos experimentales. Hasta la fecha, no acusa contradicciones que obliguen a revisarla o generalizarla.

En las dos últimas décadas, en el debate sobre el determinismo se han introducido la causalidad, el azar y un nuevo elemento llamado caos o caos determinista.

El determinismo newtoniano o laplaciano se sustenta en la formulación de las teorías físicas como ecuaciones diferenciales o, más ampliamente, como sistemas dinámicos. Con estos objetos matemáticos podemos expresar las leyes o principios físicos y aplicarlos a situaciones generales o concretas y deducir la evolución de los sistemas físicos.

Desde principios de siglo se comenzó a observar una serie de propiedades que dificultaban la explicación de un gran número de sistemas dinámicos, pues sus soluciones mostraban complejidades insospechadas en los sistemas ya resueltos. Por diversas razones la naturaleza de los escollos no resultó clara hasta hace poco tiempo; en gran medida la capacidad de cálculo de las modernas computadoras ha revestido gran importancia para superar los problemas, aunque también han constituido un factor importante para ello la maduración de muy diversas ideas y técnicas de la matemática moderna y el creciente interés por estos temas.

El asunto se relaciona con lo que llamamos condiciones iniciales, es decir el estado de un sistema en un instante determinado. Recordemos la inteligencia superior invocada por Laplace, que requiere conocer la situación de todos los elementos integrantes del universo, o sea el conjunto de las condiciones iniciales del universo. Desde luego aquí estamos hablando de un sistema delimitado y suficientemente conocido por nosotros, como puede ser el sistema planetario o cualquier otro de los que cotidianamente consideramos en el estudio de la física o de sus aplicaciones. Pues bien, puede demostrarse que, considerado un sistema dinámico bien definido y unas condiciones iniciales, se puede determinar el comportamiento total del sistema para todo el futuro y el pasado del sistema. Naturalmente en ello radica el sentido determinista de las teorías físicas sustentadas en ecuaciones diferenciales.

Esto es un teorema y no ha cambiado, pero no dice nada sobre el comportamiento de los sistemas dinámicos ante

pequeños cambios en las condiciones iniciales. Imaginemos un sistema dinámico, por ejemplo el que se utiliza para estudiar el movimiento de un planeta en torno del sol. Sabemos que, en ciertas condiciones iniciales —en nuestro ejemplo la posición y la velocidad del planeta en un cierto instante—, podemos, al resolver el sistema de ecuaciones, conocer la posición y velocidad del planeta en cualquier otro tiempo futuro o pasado.

Ahora bien, ¿qué ocurre si pensamos en una situación muy similar, en el sentido de que comenzamos con unas condiciones iniciales muy parecidas pero distintas de las anteriores? Es posible predecir que la evolución de los dos sistemas será similar y que, al diferir sólo un poco en un cierto tiempo, diferirán sólo un poco en tiempos futuros. Esto es lo que ocurre en los sistemas que llamamos integrables —como el de nuestro ejemplo del planeta alrededor del sol—, únicos que podían ser estudiados con las herramientas matemáticas y computacionales existentes hasta hace unas décadas. Mucha gente pensaba que, puesto que los sistemas susceptibles de estudio se comportaban de esa forma, los demás también lo harían.

Sin embargo, no ocurre así: hay sistemas cuyos estados futuros divergen muy pronto, al grado de separarse por completo después de relativamente poco tiempo, pese a comenzar en condiciones iniciales cercanas. Seamos más precisos: en los sistemas del primer tipo la separación entre dos soluciones cuyas condiciones iniciales apenas difieren crece proporcionalmente al tiempo transcurrido, mientras que en los del segundo tipo esa separación crece exponencialmente con el tiempo.

Veamos un ejemplo de lo que esto significa. Tomemos el número dos. Un crecimiento proporcional al tiempo sería, por ejemplo, que lo multiplicáramos por dos veces el número de segundos transcurridos; así, después del primer segundo valdría cuatro, después del segundo valdría ocho, después del tercero doce, después del cuarto dieciséis, después del quinto veinte, después del sexto veinticuatro y así en adelante. En el caso de un crecimiento exponencial, en vez de multiplicarlo por dos veces el número de segundos, cada segundo lo duplicaríamos; así, el dos después del primer segundo valdría cuatro, después del segundo valdría ocho, después del tercero valdría dieciséis, después del cuarto treinta y dos, después del quinto sesenta y cuatro, después del sexto ciento veintiocho y así sucesivamente. Se advierte con claridad la diferencia; aún más, después de, digamos, cien segundos, tendríamos en el primer caso cuatrocientos y en el segundo una cifra expresable sólo mediante treinta dígitos.

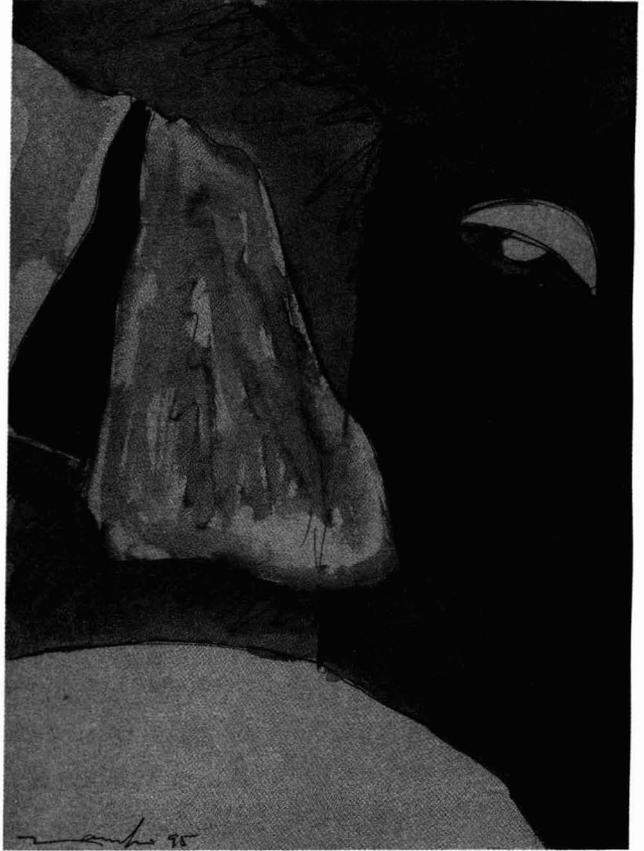
Cuando un sistema presenta esa divergencia exponencial resulta, en la práctica, impredecible, pues cualquier pequeño error cometido al establecer las condiciones iniciales crecerá de modo incontrolable hasta que los cálculos dejen de corresponder por completo con la realidad. Incluso mínimas inexactitudes de cálculo inevitables al emplear números provistos por lo general de una cantidad infinita de cifras decimales producirán resultados carentes de sentido, ya que

habrán de separarse en forma exponencial del verdadero comportamiento del sistema. Por lo demás, estos sistemas dinámicos no son pocos o raros, sino la inmensa mayoría de los existentes. No los conocimos antes porque no los podíamos resolver o estudiar y, por tanto, los ignorábamos o presumíamos que no diferían en gran cosa de los otros.

Otra propiedad de estos sistemas se deduce fácilmente de la divergencia exponencial. Imaginemos por ejemplo el movimiento de un planeta en un sistema en el que hay dos soles —en nuestra galaxia hay multitud de estrellas dobles, así que no es un ejemplo ficticio—. Pensemos que el planeta permanece en una región relativamente pequeña del espacio situado alrededor del sistema. Supongamos también la presencia de otro planeta cuyas condiciones iniciales difieran un poco de las del primero, pero que también permanece dentro de un espacio finito en torno a los dos soles. ¿Cómo pueden divergir las órbitas de esos planetas exponencialmente sin que se separen de manera indefinida, puesto que ello los alejaría de la vecindad de sus soles? El fenómeno sólo puede explicarse si se conciben órbitas que se enredan en formas muy complejas, similares a las trayectorias de los ingredientes durante el proceso de mezcla cuando se amasa el pan. En efecto, se trata de órbitas sumamente complicadas que semejan las irregularidades del ruido o de algo que recibe impulsos azarosos; de hecho, en ciertos aspectos resulta imposible distinguirlos de los procesos aleatorios. De aquí que a estos sistemas se les llame caóticos, aunque, por ser en realidad del todo deterministas, a sus propiedades se les asigna el aparentemente contradictorio nombre de caos determinista.

En el debate entre determinismo, causalidad, azar y necesidad se ha encontrado otro elemento, el caos determinista, que nos obliga a preguntarnos cuestiones tan importantes como la posibilidad de diferenciar los resultados de un proceso realmente estocástico y los producidos por un sistema caótico, o, incluso, a cuestionar la existencia misma del azar, ya que en el plano operativo podría ser indistinguible del caos dinámico. Desde luego las propiedades de estos sistemas son, a pesar de su complejidad y aparente irregularidad, susceptibles de estudio matemático y esto ha abierto todo un campo de nuevas investigaciones, tanto matemáticas como físicas, de gran importancia y con enormes perspectivas de desarrollo.

Todavía falta por abordar un punto general en el sentido de las relaciones entre la teoría del caos dinámico y la mecánica cuántica: la ecuación determinista que gobierna la evolución de los sistemas cuánticos —esto es de las amplitudes de probabilidad— no puede presentar el fenómeno del caos en ningún caso, ya que es lineal, mientras que las ecuaciones de la mecánica clásica, las de Newton, sí son capaces de hacerlo, pues son no lineales. De ello resulta que, desde el punto de vista clásico, tenemos un determinismo totalmente causal, insuficiente en la práctica para efectuar la predicción a largo plazo, mientras desde la perspectiva cuántica contamos con un determinismo predecible, pero implícitamente



probabilista. Desde luego, al considerar, como debe ser, una teoría, la clásica, como un límite de la otra, surgen contradicciones y problemas de gran interés e importancia hoy en proceso de investigación, llamados en conjunto caos cuántico.

La introducción del caos determinista ha abierto perspectivas de desarrollo en las ciencias físicas y matemáticas, pero también de otras muchas. Innumerables fenómenos que parecían, por su irregularidad o apariencia azarosa, intratables en el contexto de una formulación determinista, son ahora concebibles dentro de las posibilidades del análisis matemático y en especial de la teoría de los sistemas dinámicos. Esto reviste especial interés en las ciencias biológicas, las neurociencias y las ciencias sociales, en particular las económicas. ♦

Nota bibliográfica

La lectura de volúmenes de la colección Great Books of the Western World, editada por Encyclopaedia Britannica, han constituido una gran ayuda.

Recomendamos la lectura del libro de David Ruelle *Chance and Chaos*, editado por Princeton University Press.

También el libro de Stuart A. Kauffman, *The Origins of Order*, editado por Oxford University Press, ha resultado de utilidad.

Para una revisión técnica y general puede leerse el libro *The Science*, así como muchos de los innumerables libros y artículos publicados recientemente sobre estos temas. El lector encontrará también abundantes programas de computadora que ilustran estas cuestiones.