

**DOS CONTRIBUCIONES SOBRE LA ESTABILIDAD
Y EL DETERMINISMO DE LOS SISTEMAS**

***Miguel Espinoza Verdejo**

Universidad de Estrasburgo. Francia.

RESUMEN

La observación principal de Ilya Prigoiné, tal como la desarrolla en *Las leyes del caos* (1993), es que la ciencia natural contemporánea pone de manifiesto la existencia del azar y del caos en la constitución de la mayoría de los sistemas dinámicos; afirma que tales sistemas son una mezcla irreductible de determinismo y de azar. El químico ruso contrapone así su interpretación de la ciencia contemporánea -actividad consciente del indeterminismo y de la irreversibilidad temporal creadora, y que por eso estaría en lo cierto- a la ciencia moderna que habría estado, según él, condicionada por un tiempo reversible conservador y erróneamente orientada hacia el determinismo. Por su parte, la contribución principal del físico francés Théodore Vogel en su obra *Por una teoría mecanicista renovada* (1973) consiste en mostrar que no existe mejor modelo científico que el mecanicismo. Este modelo presupone la estabilidad de los sistemas, la relación causal, el determinismo, y se enraza en la esperanza de que las matemáticas, la herramienta principal del pensador mecanicista, permitirán renovar las categorías mecanicistas y reducir, en consecuencia,

las áreas de indeterminación. Ahora bien, yo no adopto una actitud neutra en esta oposición de filosofías de la ciencia natural sino que intento criticar las ideas de Prigogine y poner de relieve el valor de la posición de Vogel.

ABSTRAC

“Two contributions on the stability and determinism of natural systems”. One of the main teachings of Ilya Prigogine’s book *The Laws of Chaos* (1993) is that contemporary natural science neatly reveals the presence of chance and chaos in the constitution of most dynamical systems. He states that indeterministic systems are an irreducible mixture of determinism, randomness and stochasticity. The Russian chemist opposes thus his interpretation of contemporary science as an activity rightly conscious of indeterminism and the creativity of an irreversible time, to a modern science which was, according to him, conditioned by a reversible time incapable of creativity and erroneously oriented towards determinism. On the other hand, the French physicist Théodore Vogel’s main contribution in *For a Renewed Mechanistic Theory* (1973) is to show that mechanism is our best scientific model. This model presupposes the stability of systems, causation and determinism. The mechanistic thinker hopes that the development of mathematics, its main tool, will allow the renewal of the mechanistic categories and the reduction of the zones of indeterminacy. Now face to these opposed philosophies of natural science my attitude is in no way neutral: I try to criticize Prigogine’s vision and argue for Vogel’s belief in causality, determinism and the unity of the method of modern and contemporary science.

INTRODUCCIÓN

La primera contribución analizada es la de Ilya Prigogine tal como la expone en su libro *Las leyes del caos (Les lois du chaos*, Flammarion, París, 1993). La segunda, aunque le precede en el tiempo, es la de Théodore Vogel desarrollada en *Por una teoría mecanicista renovada (Pour une théorie mécaniste renouvelée*, Gauthier-Villars, París, 1973).

Ilya Prigogine, premio Nobel de química en 1977, tiene el don de la exposición oral y escrita de temas difíciles, sus instructivos textos se leen con agrado. *Las leyes del caos* mantiene el tono vivo de las conferencias al origen del libro pronunciadas en la Universidad de Milán en 1992. Corriendo el riesgo de ser aguafiestas, advierto que en algún momento hay que salir del encanto y reaccionar.

La ciencia de lo estable. Un preámbulo hará resaltar lo que el autor quiere hacer. En la *Física*, Aristóteles muestra una marcada preferencia por lo regular y ordenado, lo que se explica por la acción de un determinismo causal producto de condiciones antecedentes, o bien por un determinismo producto de la finalidad o de la forma, identificadas a la esencia inteligible. La repetición, la regularidad, el orden de los hechos permite agruparlos en tipos estables, contenido de las ciencias particulares que se construyen gracias al encadenamiento lógico de los diferentes

sectores. Y sin negar que los acontecimientos contingentes, fortuitos o accidentales resultan de la acción de causas, los deja de lado con la indiferencia con que se trata lo marginal y lo falto de interés. La predilección aristotélica por lo estable y lo regular ha dominado el curso de la ciencia, y aunque los modernos hayan abandonado la sustancia (o materia) reemplazándola por una relación (la masa es un coeficiente), y hayan renunciado a la causalidad reemplazándola por una función (la correlación entre eventos), no se puede negar la importancia de la ley de la naturaleza en la ciencia moderna. La ley da testimonio del interés por la regularidad y el orden. Así, aproximadamente las mismas condiciones iniciales producen, en aproximadamente las mismas circunstancias, aproximadamente las mismas consecuencias cuando se trasladan los fenómenos en el espacio y en el tiempo (ley causal); o bien: aproximadamente los mismos fenómenos varían juntos (ley funcional).

Prigogine diría que la validez de lo recién descrito se terminó hace cien años: “El siglo XIX nos ha legado una herencia doble. Por una parte tenemos las leyes clásicas de la naturaleza, las leyes de Newton nos proporcionan el ejemplo supremo de tales leyes. Estas leyes son deterministas: dadas las condiciones iniciales, podemos predecir todo evento pasado o futuro; en consecuencia nos hablan de certidumbres. Por lo demás, estas leyes son simétricas en relación al tiempo. El futuro y el pasado tienen el mismo rol. Pero el siglo XIX nos ha legado también una visión evolutiva, temporal, del universo, lo que se consigue a través del segundo principio de la termodinámica. Este principio expresa el crecimiento de la entropía en el curso del tiempo e introduce así la flecha del tiempo. Desde ese entonces el pasado y el porvenir ya no tienen un rol

simétrico” (p. 8). Prigogine ha dedicado una gran parte de su esfuerzo a entender el segundo legado: su interés se concentra no en el ser sino en el devenir, no en lo estable sino en lo caótico, no en lo eterno sino en lo temporal, no en el determinismo sino en el indeterminismo, no en la certeza sino en la probabilidad. Desde que el caos ha sido puesto en un sitio de honor, piensa Prigogine, la ciencia ya no es la misma que antes.

Me parece que los sistemas caóticos, tal como los concibe el autor, tienen cinco propiedades íntimamente vinculadas entre ellas: 1° sensibilidad a las condiciones iniciales, 2° la evolución contiene una serie de bifurcaciones, 3° la evolución es una mezcla de determinismo y de indeterminismo, 4° las bifurcaciones introducen el tiempo irreversible, y 5° las bifurcaciones explican la creatividad y la emergencia de nuevos seres y propiedades. A continuación propongo algunos comentarios sobre estas propiedades.

Inestabilidad y bifurcación. Uno de los primeros en concebir la inestabilidad exponencial fue H. Poincaré: “pequeñas causas, grandes efectos” (ver, por ejemplo, “Le problème des trois corps”, 1891, y *Science et méthode*, 1903). Luego en el artículo “On the Nature of Turbulence” de 1971, D. Ruelle y F. Takens utilizaron la noción de sensibilidad a las condiciones iniciales para describir los sistemas caóticos. Eso significa que en el espacio de las fases dos trayectorias inicialmente tan próximas una de la otra como se quiera, se separan luego necesariamente. Dos movimientos en un estado inicial muy cercanos pueden evolucionar de manera muy diferente y la incertidumbre inicial se desarrolla de manera exponencial con el tiempo. Después de una evolución larga con respecto al tiempo de

Liapunov, se pierde la memoria del estado inicial. (El tiempo de Liapunov permite definir una escala temporal con respecto a la cual la expresión “dos mismos sistemas” -es decir dos sistemas que corresponden a la misma descripción inicial- tiene un sentido efectivo). La evolución de un sistema caótico es imprevisible.

Las bifurcaciones tienen una función eminente en la cosmología de Prigogine: son las causas que explican hechos ignorados por la mecánica o la dinámica clásicas como la historicidad y la irreversibilidad del tiempo. Algunas ecuaciones diferenciales admiten soluciones inestables, hay entonces una bifurcación. (*Grosso modo*, diríamos que una solución de una ecuación diferencial es estable si una variación muy pequeña en las condiciones iniciales o de frontera genera cambios muy pequeños en el desarrollo de la solución). Doy un par de ejemplos de bifurcación. Sea la ecuación diferencial $y' = ay$ donde a es el parámetro. Si a es estrictamente superior a 0, entonces la solución es exponencial. Llamémosla solución A. Si a es igual a 0, entonces la solución es una recta, es el caso límite (solución B). Si a es estrictamente inferior a 0, entonces la solución es sinusoidal (solución C). Una variación infinitesimal de a hace pasar de A a C. Otro ejemplo: una bolita ubicada en el fondo de una esfera está en equilibrio estable mientras la esfera comienza a girar lentamente, pero hay un umbral de velocidad a partir del cual el equilibrio al fondo de la esfera ya no es estable y aparece otra posición de equilibrio a cierta distancia del fondo, y es ahora esta nueva posición la que es estable. Diga lo que diga Prigogine, los mecanismos que comportan bifurcaciones no refutan ni la causalidad ni el determinismo, y lo interesante es ver cómo una causa ínfima produce un gran efecto.

Las leyes fundamentales de la física clásica presuponen un tiempo reversible, el tiempo es una variable que puede adoptar valores positivos o negativos, el tiempo no introduce ninguna novedad que no sea en principio predecible y describe lo que el autor llama “estructuras muertas”, sin disipación de energía (sistemas conservadores). Esto ocurre mientras se consideran trayectorias únicas, pero la evolución “sin historia” cambia cuando aparecen las bifurcaciones. Esto pasa con los sistemas disipativos “lejos del equilibrio”. El autor da como ejemplo simplificado el caso de un sistema formado por dos moléculas X e Y de colores “diferentes”. “La imagen intuitiva que nos formamos de las colisiones es que corresponden a encuentros que se producen por azar. Deberíamos entonces prepararnos a encontrar flashes de azul asociados con X o de rojo asociados con Y. En vez de eso vemos una alternancia periódica de colores rojo y azul. Hoy conocemos un gran número de osciladores químicos de ese tipo. La aparición de la solución oscilante lejos del equilibrio se realiza a partir de un punto de ‘bifurcación’” (pp. 29-30). Desde los puntos de bifurcación emergen diferentes soluciones y la elección entre las soluciones está dada por un proceso probabilista. A partir de esta observación, Prigogine ve la evolución de los sistemas caóticos lejos del equilibrio como una sucesión de estadios descritos por leyes deterministas -la trayectoria del sistema donde no hay punto de bifurcación- y por leyes probabilistas: en el punto de bifurcación la predicción tiene un carácter probabilista. Para el autor hay entonces una continuidad entre lo determinado y lo probable (imagen, por ejemplo, diría yo, de nuestra propia experiencia que parece estar constituida de momentos determinados y de momentos libres).

La irreversibilidad. A causa de las bifurcaciones los sistemas caóticos tienen una temporalidad y una historia irreversibles. El químico moscovita los contrapone a los sistemas “muertos” o “eternos”. La simetría temporal pasado-futuro se rompe. Lo interesante según él es que en algunos casos los sistemas lejos del equilibrio son creadores de estructuras. Afirma por ejemplo que sin las correlaciones de largo alcance debidas al no-equilibrio no habría ni vida ni cerebro. Como en Bergson, el tiempo irreversible y su rol creador son en Prigogine una plaza central donde convergen las diferentes vías de su pensamiento. Se queja de que las leyes de la dinámica clásica, relativista o cuántica no contengan la dirección del tiempo y propone entonces que se reformen las leyes de las dinámicas tradicionales.

Prigogine quisiera introducir el tiempo irreversible en la descripción física del mundo (ver, además, por ejemplo, su libro *From Being to Becoming. Time and Complexity in the Physical Sciences*, 1980). El espacio o el espacio-tiempo por un lado, la materia o la materia-energía por otro, constituyen la dualidad básica de la física. En la medida en que el espacio-tiempo se describe geoméricamente, se describe con categorías eternas y es imposible hacer justicia al tiempo irreversible. Queda la materia y la posibilidad de asociar el tiempo irreversible a ella. Recordemos que en la mecánica el símbolo usado para representar el tiempo, t , es susceptible de adoptar valores positivos o negativos, como ocurre, por ejemplo, en una dinámica hamiltoniana (cambio de t en $-t$). Para representar la irreversibilidad, es verdad que se puede construir un sistema diferencial que presente atractores y caracterizar de cierta manera una evolución hacia un límite, pero, curiosamente, el estado asintótico llega a ser él mismo

reversible: “cuando se considera el límite para t tendiendo hacia el infinito, que se tome el infinito +1 o el infinito simplemente, se tiene el mismo límite. Así, en cierto modo, se elimina el efecto del tiempo [irreversible] en el límite mismo” (R. Thom). En suma, hay que reconocer con Prigogine -y no veo cómo podría ser de otra manera-, que el tiempo es fundamentalmente irreversible, y la afirmación de que todos los procesos físicos son reversibles es absurda. Entre los problemas que quedan pendientes está el de elaborar una física de la irreversibilidad que evite un escollo como el presentado por Thom.

Las leyes del caos. Curiosa expresión. Si hay tales leyes, entonces el caos no es el desorden, la confusión incontrolable. El caos en la ciencia de hoy no es lo que el sentido común llama así sino el resultado de la inestabilidad. Si hay leyes del caos entonces hay modelos, más o menos deterministas, que describen la evolución de los sistemas caóticos. Según Prigogine, el caos expresa un azar *in re*. La justificación que da es que las leyes del caos son las probabilidades: epistemológicamente, las probabilidades se oponen a la certeza, ontológicamente, se oponen al determinismo. Recordemos que algunos científicos del siglo XIX como Poincaré hablaban, sin contradicción, de la ciencia del azar para referirse a las probabilidades porque éstas eran para ellos un remedio para salir del paso dada la complejidad de las pequeñas causas que producen efectos sorprendentes (ver, por ejemplo, Poincaré, “Réflexions sur le calcul des probabilités”, 1899, “Le hasard”, 1907, reeditados en *L'Analyse et la recherche*, Hermann, París, 1991).

De acuerdo a Prigogine, a partir de un modelo probabilista se puede sacar una conclusión ontológica: el indeterminismo o el azar serían primitivos, existirían en la realidad en sí: “Se admitía que las probabilidades no eran sino la expresión de nuestra ignorancia. Para los sistemas inestables, eso no es así. Las probabilidades adquieren una significación dinámica intrínseca” (p. 11). Esta afirmación, no justificable por la experiencia, refleja una creencia metafísica, pero Prigogine no lo reconoce así y continúa su discurso mezclando lo metafísico a lo científico. Esta mezcla infeliz puede dejar en el lector poco sagaz la impresión, errónea, que la parte científica o positiva descrita por el autor no puede ser prolongada sino por una ideología del azar. Propongo entonces que se retengan firmemente estas cuatro afirmaciones: 1) las probabilidades son un *modelo* descriptivo, 2) la teoría de las probabilidades es un modelo matemático deductivo *determinista* apto para describir un determinismo débil, es decir, la evolución de una clase de fenómenos y no de un fenómeno individual, 3) *no se puede probar* que las probabilidades *reflejen necesariamente un indeterminismo real*, 4) al tratar este tema hay que *distinguir lo epistemológico* de lo *ontológico*: el indeterminismo epistemológico no implica el indeterminismo ontológico.

La imposibilidad de una ciencia nueva. Prigogine tiene la costumbre de razonar exponiendo lo que él considera como quiebres radicales y *Las leyes del caos* es una ilustración de esta afirmación. Habría por una parte una ciencia clásica determinista en búsqueda de la certeza y una ciencia contemporánea indeterminista que se satisface con lo probable; una concepción clásica de las probabilidades como reflejo de la ignorancia y una concepción reciente que le da un alcance ontológico; un período

clásico sin tiempo irreversible y una época reciente que considera al tiempo irreversible como la variable principal; un científico clásico para quien sólo los sistemas estables cuentan y un científico, contemporáneo nuestro, dedicado al estudio de los sistemas inestables (el “cristal” y el “humor” de Atlan, los “relojes” y las “nubes” de Popper). Se opone entonces lo nuevo a lo clásico y se hace el elogio de lo novedoso: habría una ciencia nueva y una nueva racionalidad. “La introducción del caos nos fuerza a generalizar la noción de ley de la naturaleza y a introducir los conceptos de probabilidad y de irreversibilidad. Se trata de un cambio radical porque, según esta visión, el caos nos conduce a reconsiderar nuestra visión fundamental de la naturaleza” (p. 15).

Esta manera de ver me parece exagerada. Hay más bien una continuidad en la historia de la ciencia moderna. A mi juicio no existe ni puede existir una ciencia nueva; el objetivo y los medios de la ciencia fueron, son y serán los mismos: se trata de aprehender la inteligibilidad natural, de describir, de controlar y de explicar los fenómenos mediante modelos contruidos gracias al lenguaje natural y a las matemáticas. Explicar quiere decir subir en la escala de la necesidad, vincular los fenómenos de apariencia aleatoria a las leyes, a una necesidad, necesidad que se manifiesta en la causalidad y en la deducción. Esta concepción de la ciencia es satisfecha de manera óptima por los sistemas fisicomatemáticos, por los sistemas laplaceanos, es decir, sistemas perfectamente controlables, predecibles y retrodecibles. Propongo llamarlos “sistemas de primera clase”. Estos sistemas son perfectamente definidos, las incógnitas dependen de un número finito de variables independientes, las leyes estructurales que determinan la evolución están matematizadas, es decir

que son ecuaciones “cerradas” lo que significa que el número de ecuaciones es por lo menos igual al número de incógnitas. Las leyes, que son ecuaciones, representan lo que hay de necesario en la evolución de estos sistemas, y la parte asociada a la contingencia se formula también de manera satisfactoria: el estado del sistema en un momento dado que fija las condiciones iniciales, las acciones a distancia, etc. Aquí lo epistemológico y lo metafísico se funden. Pero, desgraciadamente, no todos los sistemas son tan satisfactorios, sea porque no se pueden definir perfectamente, o porque no se conocen todas las leyes que rigen su evolución, o porque no todas las leyes están matematizadas, sea en fin porque la parte asociada a la contingencia no se conoce perfectamente. Tales son los sistemas “de segunda clase”. Ellos son de origen experimental. La evolución está también determinada, hipótesis justificada parcialmente por la existencia de leyes, pero la predicción y la retrodicción precisas son imposibles. Finalmente, los componentes de la “tercera clase” son los sistemas en que priman las probabilidades y las estadísticas: las definiciones se dan en términos estadísticos, las leyes son probabilistas, y en lugar de la certeza se obtienen predicciones y retrodicciones con una probabilidad determinada. (No he tratado de ser exhaustivo en esta clasificación de sistemas deterministas).

Por lo anterior, en vez de oponer la ciencia clásica determinista y la ciencia nueva indeterminista, lo correcto es reconocer que toda ciencia trabaja con modelos deterministas más o menos fuertes y que se recurre a modelos deterministas débiles cuando no queda otro remedio. Probablemente lo que se degrada no es el determinismo ontológico sino nuestra manera de aprehenderlo. Nuestros contemporáneos dedicados al

estudio de la termodinámica y del ser vivo, problemas donde el tiempo irreversible es ineluctable, tienen la tarea de fabricar modelos cada vez más adaptados, y no es porque el modelo físico-matemático estricto no se aplica que se necesita una ciencia nueva o una nueva razón. Por eso me parece inconveniente y sin pertinencia lo que dijo Sir James Lighthill, siendo presidente de la Unión Internacional de Mecánica Pura y Aplicada, en un discurso publicado en 1966 y comentado con entusiasmo por Prigogine. En su alocución Lighthill pide disculpas, en nombre de todos los mecanicistas, a todas las personas cultas por haberlas inducido en error haciéndoles creer que los sistemas que satisfacen las leyes newtonianas del movimiento están determinados. Prigogine no deja pasar la ocasión de subrayar que es una gran cosa que los expertos por fin reconozcan “que durante tres siglos se han equivocado acerca de un punto esencial de su campo de investigación” (p. 42). El autor recuerda que desde los años 1960 se sabe que existen sistemas simples cuya evolución es caótica, por eso ya no puede decirse que el indeterminismo sea exclusivamente el resultado de la complejidad, y serían estos nuevos descubrimientos los que habrían motivado el *mea culpa* de Lighthill. Pero ¿por qué pedir disculpas? Laplace ya se había dado cuenta, a comienzos del siglo XIX, que los sistemas físicomatemáticos perfectamente deterministas son excepcionales, razón por la cual escribió su *Teoría analítica de las probabilidades* (París, 1812), y la grandiosa e intrépida declaración del determinismo universal, su imaginación de la inteligencia que puede calcularlo todo, aparece al comienzo de su *Ensayo filosófico sobre las probabilidades* (París, 1814). No me cabe duda de que si Laplace viviera hoy, diría que hay que continuar la elaboración de modelos para aprehender de la mejor manera posible el determinismo de los sistemas

caóticos, y estaría feliz de colaborar con los matemáticos y físicos dedicados, por ejemplo, al estudio de los atractores, sugiriendo que incluso los sistemas de apariencia más caótica están regidos por seres geométricos, los cuales, en algunos casos, son complicados como los atractores extraños. No es porque se ensancha el género de sistemas estudiados o porque se revisan algunas categorías que se funda una nueva ciencia o que aparece una nueva racionalidad.

Veamos ahora la contribución de Théodore Vogel. Su conciso volumen *Por una teoría mecanicista renovada*, admirable por la calidad del fondo y de la forma, se abre con la constatación de que el mecanicismo conoció una gran fortuna durante los trescientos años que precedieron al siglo XX. Desde Descartes hasta Lord Kelvin se edificó una construcción científica considerable. Una vez reconocido lo simple de la pretensión de que se puede explicar todo en el mundo sensible “por figuras y movimientos” (Descartes y otros), así como lo ingenuo de la creencia en la realidad intrínseca de estos modelos, Vogel menciona varias propiedades del mecanicismo que él quisiera ver mejoradas y expandidas en su aplicación. El tono del volumen es una mezcla de nostalgia y de fuerza tranquila: nostalgia de un pasado no muy lejano en que el mecanicismo era casi unánimemente reconocido como el núcleo de la ciencia de la naturaleza, fuerza tranquila originada en la idea, subyacente al mecanicismo, que lo conocible del universo es descriptible matemáticamente.

El carácter indispensable de las matemáticas. “La esperanza secreta de una explicación unitaria del mundo tal vez no nos ha abandonado

completamente” (p. 2). Es sobre el componente matemático que recaen principalmente las esperanzas depositadas en el mecanicismo. Las matemáticas son la herramienta más poderosa del mecanicista como lo muestra la mecánica racional. El deseo de obtener una comprensión unitaria altamente perfeccionada del mundo sensible gracias a los modelos matemáticos “era una noble ambición y un punto de vista cuyo principio permanece justo” (ibid.). Aunque de alcance más modesto que las aspiraciones desmesuradas de los primeros mecanicistas, el “neomecanicismo” preconizado por el autor se desarrolla gracias a la convicción de que las matemáticas son el lenguaje natural del razonamiento riguroso, lo que puede emplearse cada vez que los conceptos son “claros y distintos”. Vogel confía en la capacidad de la razón de clarificar los conceptos, optimismo compartido por los filósofos racionalistas que han imaginado incluso la elaboración de una metafísica rigurosa o exacta (Leibniz, Gödel), y piensa, más allá y con razón (la historia de las matemáticas testimonia en su favor) que las matemáticas son capaces de crear nuevos entes que permitirán la elaboración de modelos mejor adaptados al estudio de sistemas. En este contexto el autor menciona, sólo de paso, la contribución de las distribuciones de Laurent Schwartz a la física matemática.

Etapas y alcance del procedimiento mecanicista. Uno de los méritos principales del autor es precisar la esencia del mecanicismo dando pistas además para extender la actitud mecanicista al estudio de una serie de sistemas que han sido hasta ahora reticentes a tal tratamiento. Para una mejor comprensión trato separadamente las propiedades del mecanicismo que el autor entrelaza. El método neomecanicista prolonga el

procedimiento típico de la mecánica racional. Quien desarrolle por ejemplo la dinámica teórica o la dinámica topológica actuará como sus predecesores mecanicistas. En aras de la claridad, desdoblaré en seis etapas lo que Vogel resume en tres: 1° El pensador mecanicista delimita una región del espaciotiempo y elige un sistema concreto, un todo relativamente estable y separable de su ambiente. 2° Intenta enseguida abstraer de este sistema ciertos aspectos significativos que trata como si constituyeran un grupo cerrado. Esta abstracción es definitiva e irreversible, el mecanicista no se autoriza a introducir más tarde, en el curso de su razonamiento, otras cualidades que había dejado de lado al definir el sistema, eso viciaría lo ya hecho y tendría que recomenzarlo todo. 3° A las propiedades elegidas el mecanicista hace corresponder una serie de entes matemáticos. 4° Luego postula que los objetos sensibles tienen entre ellos algunas relaciones específicas como las que se encuentran, por ejemplo, en las ecuaciones diferenciales que describen las leyes de evolución de todos los fenómenos de una misma clase. 5° De estas relaciones deduce el número más elevado posible de consecuencias lógicas. Finalmente, 6° el mecanicista traduce las consecuencias lógicas al campo de lo observable para verificar hasta qué punto el procedimiento es adecuado (pp. 4, 5, 143). No habría que creer que lo descrito es aplicable solamente a los sistemas físicos, el autor piensa que tal procedimiento es extensible a todo sistema natural, físico o biológico, y en principio el modelo mecanicista puede aplicarse también al ser humano porque somos sistemas naturales. Apreciemos la audacia y la lucidez de Vogel: “Hemos intentado sugerir... el interés que presentaría una tentativa de explicación análoga de un cierto número de procesos biológicos y sociales; si no hemos propuesto aplicaciones explícitas a tales problemas, es porque

nuestra falta de competencia habría podido conducirnos a presentar axiomatizaciones ingenuas más susceptibles tal vez de alejar que de atraer a los especialistas. Por poco que hayamos conseguido convencerlos, les corresponde a ellos tomar la iniciativa” (p. 143).

Los sistemas dinámicos. La teoría de sistemas es una teoría general e interdisciplinaria cuyo objetivo es el estudio matemático de los sistemas (recordemos que Vogel es el autor de varios textos sobre la física matemática y sobre la teoría de sistemas). Se trata entonces de una filosofía natural, de una reflexión situada a medio camino entre la ciencia y la filosofía. Por no ser una ciencia “dura”, no es por lo general bien vista, por ejemplo por los físicos. De acuerdo a uno de los conceptos de sistema, es éste un conjunto de elementos, materiales o no, caracterizados por su composición; los elementos están relacionados unos a otros. Ahora bien, se ha hecho notar que esta caracterización es tautológica en la medida en que los elementos son a su vez entidades complejas cuyos componentes interactúan.

Otra manera de caracterizar el sistema consiste en considerarlo como un dominio del espacio-tiempo separado del medio exterior (del resto del mundo) por una pared o superficie, real o ideal. Expongo a continuación algunas generalidades sobre los sistemas y algunas observaciones personales que Vogel, me parece, aceptaría. Si es impermeable a la materia, el sistema es cerrado, abierto en caso contrario. Un sistema está aislado si no intercambia ni con otros objetos ni con el medio exterior ninguna forma de materia, calor o energía. A cada instante el sistema está definido, en una escala dada, por los valores de un cierto número, a veces

elevado, de variables. Si el estado persiste, es un estado de equilibrio, y un sistema fuera del equilibrio evoluciona sufriendo transformaciones. El sistema describe un ciclo si después de una serie de transformaciones vuelve al estado de equilibrio. En un sistema estable las perturbaciones se amortiguan; en cambio en un sistema inestable las perturbaciones producen desviaciones que se amplifican. Se distingue una estabilidad de la materia y una estabilidad de la forma: en el primer caso el control de las condiciones iniciales permite el control de las posiciones al cabo de un cierto tiempo; en el segundo caso, aunque no haya estabilidad de la disposición de las partículas, una forma subsiste: es la estabilidad estructural. Hay sistemas disipativos (que pierden energía por roce) y sistemas conservadores o hamiltonianos, como los sistemas astronómicos. Hagamos también alusión a los sistemas simples y complejos: los primeros se definen mediante un número reducido de variables, de dimensiones o de grados de libertad, mientras que los sistemas complejos se representan mediante un número elevado o infinito de los mismos. Así la teoría de sistemas es un estudio interpretativo del comportamiento de estos seres: se concibe una idea de las razones o leyes inobservables tanto internas como externas al sistema que determinan que éste se comporta de tal o cual manera (*output*) dada su sensibilidad a tal o cual contacto, influencia o estímulo (*input*). Para interpretar de esta manera el comportamiento de un sistema no hay otra posibilidad excepto definir su estado interno mediante parámetros suplementarios en relación a la entrada y a la salida, parámetros que representan la naturaleza y la memoria del sistema. El hecho que la teoría de sistemas interprete las razones o leyes *inobservables* que conectan lo observable bajo la forma de entrada de datos y de salida

explica, pero no justifica, la desconfianza de los físicos por la teoría de sistemas.

Después de estas aclaraciones que permiten entender mejor el pensamiento de Vogel volvamos a él. Los objetos que retienen la atención del autor en el cap. IX son los sistemas dinámicos. Recordemos que la dinámica es la rama de la mecánica que establece el lazo entre los movimientos de los sistemas materiales y las acciones mecánicas que se ejercen sobre ellos. El movimiento implica el tiempo, por eso en cierta manera la dinámica es la descripción del paso del tiempo, del envejecimiento. En reacción a la afirmación de Bergson o de L. de Broglie que el tiempo del mecanicista es inútil e irreal, Vogel escribe: “el tiempo, tal como se lo entiende aquí, no es inútil en un mundo completamente determinado pues sirve para ordenar los estados, para dar un sentido a las cosas uniéndolas mediante cadenas evolutivas y causales” (p.52). Tal vez el tipo de evolución más simple imaginable y el más utilizado en la teoría de los sistemas es el que adopta como prototipo la ley fundamental de la mecánica racional (ley de Newton). Los sistemas regidos por ella se llaman “dinámicos” y son calificados de “autónomos” si la función no depende explícitamente del tiempo. Lo importante en este contexto de la ley fundamental de la mecánica racional no es tanto que las ecuaciones que se derivan de ella no sean difíciles de resolver numéricamente, sino más bien que la teoría es lo suficientemente completa como para permitir al físico responder a las preguntas principales sobre el sistema estudiado.

La estabilidad. Coherente con su creencia de que podemos explicar el mundo, Vogel tiene una predilección por el orden, la regularidad, lo

universal, por las características que hacen que la ciencia sea posible. Se enfatiza entonces la estabilidad y en particular la estabilidad estructural, aquella de la forma de los sistemas. La estabilidad estructural puede verse, me parece, como el concepto heredero de la identidad o de la inmutabilidad del Ser de Parménides o de las Ideas platónicas: algo es conocible si no varía, o mientras no varía, mejor dicho, si varía manteniendo una forma reconocible. Así se explica el interés del autor por los sistemas dinámicos estructuralmente estables y deterministas. Una vez que estos objetos se han entendido, uno se aventura poco a poco hacia los otros sistemas menos estables. Vogel pasa revista a varios conceptos de estabilidad, la estabilidad estructural, la estabilidad en el sentido de Lagrange, en el sentido de Poisson, la noción de cuasiperiodicidad de Harald Bohr, la estabilidad en el sentido de Liapunov (pp. 82-89). No me detengo a describir todos estos importantes conceptos y menciono sólo las propiedades esenciales de algunos: “La definición más débil es la de Lagrange: un movimiento es estable... si toda su trayectoria está contenida en un dominio limitado del espacio de representación, es decir si no se aleja al infinito”. La estabilidad estructural es “la propiedad que posee un sistema dinámico de conservar el mismo retrato topológico (naturaleza de las singularidades y de los sectores que las rodean, existencia de ciclos límites...) incluso de las trayectorias próximas a las trayectorias primitivas, cuando se modifica la función campo de las velocidades por la adición de términos suficientemente débiles en valor numérico”.

Aunque se reconoce que la idea presenta problemas difíciles no resueltos, le parece al autor que la estabilidad estructural está asegurada por la mayoría de los sistemas y que las condiciones de inestabilidad

conocidas se pueden evitar fácilmente en la construcción de una ley de movimiento. En un sistema estructuralmente estable, cuando la ley de evolución tiene un parámetro que se hace variar, el retrato topológico varía poco si el parámetro varía poco, pero para ciertos valores del parámetro, una nueva solución aparece bruscamente, y la solución diverge considerablemente de la solución original cuando el parámetro continúa variando. Así existe por lo menos un valor crítico del parámetro responsable de una bifurcación. Hay bifurcación cuando la solución de la ecuación o del sistema de ecuaciones cambia cualitativamente. Un punto del espacio de los parámetros donde ocurre un tal evento es un punto de bifurcación. De ese punto emergen dos o más ramas de solución estables o inestables, y la existencia de bifurcaciones da un carácter histórico a la evolución de un sistema. El autor hace ver que la bifurcación de los sistemas dinámicos ofrece posibilidades ricas y variadas que no han sido todavía suficientemente exploradas. (Señalemos que después de 1973, año de publicación de *Por una teoría mecanicista renovada*, han aparecido importantes trabajos en este dominio; hay, por ejemplo, artículos de V. I. Arnold, de R. Thom, y de I. Prigogine).

Los sistemas dinámicos aludidos aquí son deterministas de una manera a veces más rica y compleja que lo supuesto por el determinismo laplaceano, pero se trata en todo caso de sistemas cuyo pasado y futuro deducen del presente y de la misma manera. Aunque son sólo un caso particular de una vasta clase de sistemas, su interés reside en que su determinismo puede ser estudiado gracias al estado de avance de la teoría de las ecuaciones diferenciales. Los capítulos finales están dedicados al análisis de varios otros tipos de sistemas, a modelizar sistemas que

presentan una diferencia entre el pasado y el futuro, una de las razones por la cual el lenguaje empleado es de orden biológico o humano: sistemas hereditarios con memoria continua, sistemas hereditarios con retraso, sistemas hereditarios rompientes, sistemas dinámicos no fatales, sistemas perecederos, sistemas prolíficos. No me detengo aquí a describir estos sistemas ni a comentar lo que el autor dice de ellos, pero estas páginas serán sin duda las que más interesarán a los físicos y a los matemáticos.

Causalidad, determinismo y probabilidades. Quisiera detenerme en una última característica de la visión mecanicista, la creencia en la causalidad y en el determinismo. Eso no puede sorprender dado el rol central de las matemáticas, actividad determinista, una vez plantados los axiomas. Antes de que se hayan impuesto la inercia y la física moderna, los antiguos y medievales tenían la intuición de que “todo lo que se mueve es movido por algo”, y es este algo o motor que se llama causa de la evolución. Luego está la definición negativa de causa, *ablata causa tollitur effectus*. Vogel examina varias condiciones impuestas a la causalidad por algunos pensadores antiguos como Aristóteles. Así, una causa, un estado de un objeto o de un ser, acarrea consecuencias necesarias a otros objetos que se manifiestan como transformaciones en algunos de sus estados. Mencionemos también la continuidad, la suposición de que la transmisión del efecto tiene lugar por contacto o contigüidad, lo que exige una cierta duración, todo lo cual implica el carácter ininteligible de una acción a distancia. Otra condición es la semejanza entre la causa y el efecto: “la causa, dice Sto. Tomás de Aquino, produce un efecto que se asemeja a ella”. Estas nociones y exigencias tienen que ser revisadas a la luz del progreso de la ciencia, pero las intuiciones principales siguen sirviendo de

guía. “El ejemplo de los sistemas dinámicos basta para mostrar que la clase de sistemas para los cuales existe una relación causal no está vacía y que es incluso una clase rica que contiene todos los sistemas que componen el imponente edificio de la ciencia mecanicista” (p. 43).

Vogel no puede eludir el espinoso principio de las relaciones de indeterminación de la física cuántica (que establece la imposibilidad teórica de medir simultáneamente con toda la precisión deseada las posiciones, los desplazamientos y las cantidades de movimiento). ¿Es este principio incompatible con el determinismo? ¿Se opone acaso al determinismo la interpretación probabilista? ¿Puede explicarse la mecánica cuántica mediante variables “ocultas” en un nivel subcuántico? Cara a estos graves interrogantes, Vogel observa que ninguna respuesta verdaderamente satisfactoria ha sido dada por personas eminentes y que por eso él no tendría la suficiencia de decidir, “pero se nos permitirá decir que si la actitud no-determinista debe ser aceptada sin reservas, habría muchas explicaciones que dar y que no han sido dadas hasta ahora” (p.49). El autor no dice cuáles son estas explicaciones y varios candidatos se le vienen a la mente. He aquí algunos: explicar quiere decir mostrar cómo se producen los fenómenos y cómo evolucionan, lo que presupone causas determinantes y leyes basadas en un orden natural. La ciencia progresa gracias a la estabilidad del mundo y esto se expresa típicamente mediante el principio de causalidad que Paul Painlevé define así: “Cuando se realizan las mismas condiciones, en dos instantes diferentes, en dos lugares diferentes del espacio, los mismos fenómenos se reproducen transportados solamente en el espacio y el tiempo” (Los axiomas de la mecánica, París, 1922, p. 9). Nótese que esta definición presupone la homogeneidad del

espacio y del tiempo, por lo menos a nuestra escala, o a escala de la mecánica clásica. Incluso en la concepción positivista de la ciencia se buscan las leyes de la producción y de la evolución de los fenómenos, lo que es normal ya que sin eso no habría ni control ni predicción —todo lo cual presupone el determinismo.

En física cuántica, las relaciones de indeterminación o principio de incertidumbre no significan una refutación de la causalidad. Por ejemplo, en *Los fundamentos filosóficos de la mecánica cuántica* (1935), Greta Hermann explica que después de haber efectuado concretamente una medida y tomado nota del resultado, el físico puede restituir, hacia atrás y completamente, el encadenamiento causal que produjo necesariamente tal resultado. El desafío difícil para el mecanicismo causal y determinista es, como se sabe, la espontaneidad del “salto cuántico”. Retomemos el hilo de Vogel. Para este físico, las perturbaciones imprevisibles que introduce el azar en la explicación no significan una eliminación ni un reemplazo del determinismo “sino que lo difuminan, y los contornos del determinismo quedan perceptibles bajo la bruma de las perturbaciones”. Sin el determinismo el científico se siente desarmado, “y la conclusión práctica que sacaremos es que habrá que evitar toda teoría que conduzca a una ley estructuralmente inestable, y de utilizar los sistemas inestables en el sentido de Liapunov solamente si lo son en una región limitada que habría precisamente que cercar, y donde el experimento produce resultados no reproducibles” (p. 49).

En el mecanicismo renovado que desarrolla Vogel hay un lugar para la causa final, situación inusitada dado que tradicionalmente el

mecanicismo y la finalidad han sido considerados incompatibles; el rechazo de la finalidad por parte de la ciencia moderna se presenta corrientemente como una de las diferencias entre el pensamiento moderno y el medieval. Los mecanicistas clásicos no podían aceptar que un estado futuro pueda afectar la evolución de un sistema, pero Vogel no ve razón *a priori* para descartar la causa final (p. 105). Ella existe de manera evidente en el comportamiento animal y humano, es reconocida por la biología molecular, y por ejemplo no se pueden estudiar ni la balística, ni la navegación ni los servomecanismos sin hacer intervenir el objetivo, un estado final predeterminado, como causa que contribuye a la evolución del sistema finalista. Reconozcamos que la diferencia principal entre esta concepción de la finalidad y la finalidad biológica es que en esta última, en algún momento, no hubo programador (en algún momento el aparato visual emergió). Los ejemplos que más interesan a Vogel cuando menciona los diferentes tipos de sistemas dinámicos muestran que lo que tiene en mente es la idea de programación, de predeterminación. Esto no tiene nada de misterioso porque el objetivo, el mecanismo de regulación, se programa en el presente: se preserva el orden temporal y causal. Lo astuto de los sistemas finalistas consiste, primero, en que leen o escanean los datos que reciben mientras actúan, segundo, proceden a comparar los datos con los valores predeterminados, y tercero, son capaces de adaptar el comportamiento para mantener la identidad entre los datos recibidos mientras actúan y los valores prefijados. Puesto que la programación es de orden matemático y que la forma predeterminada es matemática, pienso que sería más apropiado calificar a este modo de causa final “causa formal”: aquí la causa formal asimila a la causa final.

La palabra sobre las probabilidades. El autor no revisa las diferentes interpretaciones de las probabilidades (subjetivista, propensionista, frecuentista, logicista, etc.), temas tantas veces tratado en los gruesos volúmenes de los filósofos analíticos anglosajones. Entre los malentendidos que habría que disipar está la creencia de que la explicación probabilista pone al azar en la base de la ciencia. Pero el cálculo de probabilidades se opone fundamentalmente al azar, es determinista en su principio aunque no en el mismo nivel en que actúan las teorías mecanicistas clásicas. El cálculo de probabilidades atribuye a los objetos que trata una medida regida por una ecuación de derivadas parciales (por ejemplo, la ecuación de Fokker-Gordon para la mecánica ondulatoria en su interpretación probabilista). La solución de este tipo de ecuación no es estocástica, salvo si se introduce el azar axiomáticamente. El cálculo de probabilidades concluye en un enunciado perfectamente determinista.

Otra observación de Vogel (aunque expuesta en un párrafo tan conciso que su comprensión es ardua, por lo tanto interpreto) es que él considera que un punto débil de la ideología del azar es haber reconocido al tiempo un carácter absoluto: el tiempo no está sometido al azar. Así, quienes, como Jacques Monod, han puesto el azar en el centro de sus sistemas del mundo, tienen que admitir que dado un tiempo absoluto infinito, una combinación de elementos a primera vista improbable puede ser tal que su producto puede dar 1. Y dado que nosotros mismos formamos parte de la combinación *a priori* improbable, ella es para nosotros una certeza, y el tiempo que pasó antes que existamos con ella ya no cuenta. Ahora bien, para que las piezas del sistema encajen, hay que

postular que el azar lo gobierna todo: las combinaciones de los elementos, las leyes que gobiernan las combinaciones. “Una vez realizada esta doble configuración, se cuaja y persiste, al menos el tiempo que podamos teorizarla, y presenta entonces un aspecto finalista...” (p. 50).

Ansiosos de novedad, recientemente varios científicos y filósofos han intentado construir un *nuevo concepto* de la razón o de la ciencia. La tentación habría sido, si no frenada, al menos disminuida por el estudio del presente libro. El lector cautivado, por ejemplo, por la retórica de Prigogine, encontrará en Vogel un retorno al equilibrio. En lo concerniente a la comprensión y al control de los fenómenos, ninguna doctrina en la historia de la ciencia supera al mecanicismo, y en consecuencia lo que se impone es mejorarlo. La lección principal del autor es que científicamente no se ha encontrado nada mejor que la estructura y los ideales del mecanicismo.

BIBLIOGRAFIA SELECCIONADA

[1] Miguel Espinoza, *Théorie de l'intelligibilité*, 2a edición, Ellipses, París, 1998.

[2] Miguel Espinoza, *Philosophie de la nature*, Ellipses, París, 2000.

[3] P. Glansdorff e I. Prigogine, *Structure, stabilité et fluctuations*, Masson, París, 1971.

[4] Alexandre Liapunov, *Problème général de la stabilité du mouvement*, Annales de la Faculté des Sciences de Toulouse, 2a serie, Tomo IX, 1907.

[5] Henri Poincaré, *L'Analyse et la recherche*, Hermann, París, 1991.

[6] David Ruelle, *Hasard et chaos*, Odile Jacob, París, 1991.

[7] René Thom, *Stabilité structurelle et morphogenese*, W. A. Benjamin, Inc., París, 1972.

[8] René Thom, « Halte au hasard, silence au bruit », in *La querelle du déterminisme*, Gallimard, París, 1990.

[9] Théodore Vogel, *Théorie des systemes évolutifs*, Gauthier-Villars, París, 1965.

* * *

* Profesor de Filosofía de la Ciencia. Universidad de Estrasburgo. Francia.