



COMPLEJIDAD Y AZAR

Rolando Rebolledo¹

Facultades de Ingeniería y Matemáticas, Universidad Católica de Chile,
Santiago www.mat.puc.cl/~rrebolle

Correo electrónico: rrebolle@uc.cl

Fecha de finalización del artículo: 1/12/12

Resumen

La comprensión del azar ha desafiado al intelecto humano desde el inicio de la indagación filosófica. Durante largo tiempo terreno de especulaciones no científicas, el azar ha recorrido un difícil camino de formalización, cuyas expresiones más avanzadas se encuentran en las teorías de probabilidades nacidas en el siglo veinte. La comprensión cabal de sus leyes requiere una mirada sintética del conjunto de las ciencias y es, en consecuencia, una tarea filosófica. Una de dichas leyes, descubierta en una primera versión por Boltzman en el siglo diecinueve, devela la relación del azar con la complejidad. Relación fundacional, donde se entrelazan los conceptos de tiempo, evolución, interdependencia, interacción, en un tejido dialéctico inherente a su movimiento. El presente artículo es una invitación a reflexionar sobre esta íntima relación del azar y la complejidad.

Palabras claves:

Azar, complejidad, atomismo.

Summary

The understanding of chance challenges the human intellect since the very beginning of philosophical query. Chance has been longtime a privileged terrain for non scientific speculations, hardly and late formalized through probability theories of twentieth century. To understand the nature of its laws requires a

¹ Doctor de Estado en Ciencias, Universidad Pierre et Marie Curie, Paris



synthetic consideration of all sciences, which is indeed a philosophical task. One of these laws, whose first version was discovered by Boltzmann during the nineteenth century, concerns the relation of complexity with chance. This is foundational relation where a number of concepts like time, evolution, interdependence, interaction, are entangled in a dialectic tissue inherent to their own motion. This article is an invitation to think about this deep relation between chance and complexity.

Key words:

Chance, complexity, atomism.

Introducción

La comprensión del azar ha desafiado al intelecto humano desde el inicio de la indagación filosófica. Ya en la antigüedad griega hay antecedentes sobre la aparición de una escuela llamada "probabilista". Se trata de un momento del desarrollo de la Academia, dirigida en el siglo II A.C. por un sucesor de Platón, su discípulo Carneades. Carneades buscaba un criterio para decidir sobre opiniones inciertas. Es decir, él distinguía el valor objetivo de la opinión (todas las opiniones son inciertas), del valor subjetivo de la misma que mide la seguridad del sujeto acerca de su veracidad. Se trata de una de las primeras apariciones de la probabilidad como una medida de la veracidad de opiniones o grado de credibilidad que varía entre la ignorancia y el saber, sus valores extremos. Durante largo tiempo terreno de especulaciones no científicas, el azar ha recorrido un difícil camino de formalización, cuyas expresiones más avanzadas se encuentran en las teorías de probabilidades nacidas en el siglo veinte. La comprensión cabal de sus leyes requiere una mirada sintética del conjunto de las ciencias y es, en consecuencia, una tarea filosófica. Una de dichas leyes, descubierta en una primera versión por Boltzmann en el siglo diecinueve, devela la relación del azar con la complejidad. Relación fundacional, donde se entrelazan los conceptos de tiempo, evolución, interdependencia, interacción, en un tejido dialéctico inherente a su movimiento.

Boltzmann ha pasado a la historia como uno de los grandes defensores del átomo, concepción básica que le permitió desarrollar la Teoría Cinético Molecular de



la materia, que dio cuenta de las interrogantes que los fenómenos termodinámicos habían planteado a la física del siglo XIX. En sus trabajos la complejidad aparece asociada a términos como equilibrio y caos, orden y desorden, y a las formas de medir la complejidad, la llamada entropía. Inspirándose en Boltzmann, en la época en que éste moría, Einstein defendería también la existencia del átomo en 1905, explicando al pasar el fenómeno conocido como Movimiento Browniano. La incidencia de las ideas de Boltzmann sobrepasa la física, por ejemplo Louis Bachelier presentó en la Universidad de París en 1900 su tesis de doctorado titulada *Théorie de la spéculation*, trabajo considerado fundacional de las finanzas modernas, fuertemente inscrito en la visión cinético molecular de la realidad. Intervino también Boltzmann en filosofía, asumiendo una posición materialista, en abierta contradicción con Ernst Mach a quien sucedió como jefe de la Cátedra de Filosofía en la Universidad de Viena. Parte importante de su trabajo en esta área se encuentra consignada en la obra *Pöpulare Schriften* [1] parcialmente traducida al inglés (ver [2]).

Las raíces clásicas del atomismo de Boltzmann

La búsqueda de Boltzmann se sitúa al nivel propio de la estructura de la materia. Se inscribe él en la tradición atomista de Leucipo, Demócrito y Epicuro, la misma que a su vez defendiese más tarde Einstein.

El atomismo de Leucipo y Demócrito tiene un origen metafísico pues sale de una meditación sobre la doctrina del Ser elaborada por Parménides. El pensamiento eleático había sido una reflexión rigurosa sobre la naturaleza del ser que llevaba a la célebre conclusión que funda en la historia el principio de contradicción:

" El ser es y no es posible que no lo sea. Es el camino de la certeza porque acompaña la verdad. El otro es: el ser no es y necesariamente el no ser es: estrecho sendero donde nada aclarará tus pasos" (Parménides, De la Naturaleza).

En la escuela de Demócrito se fragmenta el ser único de Parménides en una pluralidad de átomos en que cada uno repite el uno de los eléatas. Constituyen fuera del ser una realidad del vacío, una especie de realidad negativa que tiene por



función hacer posible el movimiento. Llegan a una afirmación no admitida por los eléatas: el no ser es. La realidad está compuesta de "algo" y de "no algo", es decir, de átomos y de vacío. Átomos indivisibles, inengendrados, indestructibles. Es interesante comparar estas opiniones con aquellas de la filosofía oriental clásica anterior a Parménides. Lao-Tse entrega una visión dialéctica del mismo problema en el texto XI del Tao-Te-King:

*"Treinta rayos convergen al núcleo central de la rueda
pero es el vacío del núcleo que hace marchar el carro.
Se modela la arcilla para hacer vasos, pero es de su vacío interno
que depende su uso..
Una casa está ornada de puertas y ventanas, es aún el vacío
que permite habitarla.
El Ser da posibilidades,
es por el no ser que se las utiliza."*

En 347 muere Platón, Grecia está a las puertas de un período muy convulso donde la inestabilidad política va a la par con la decadencia de los valores humanos. Epicuro surge como uno de los contradictores de Platón. Inspirándose de Leucipo y Demócrito marca con ellos sus diferencias. Para el materialista Epicuro, el átomo tiene un peso esencial, sus figuras no se dan en número infinito sino que finito, el átomo es en el hecho indivisible y no porque así sea postulado. Por último, el átomo posee una fuente contingente de movimiento, la declinación. Así, la combinación de la magnitud, la forma y el peso son diferencias que el átomo posee en sí mismo, en tanto la disposición, la forma y la orientación son características que pertenecen al átomo en su relación con otros objetos.

Haciendo suyas en forma crítica las posiciones atomistas de los pensadores griegos, para Boltzmann el problema central de la filosofía es la relación entre existencia y conocimiento o gnoseología. Para caracterizar su actitud a este respecto, se acostumbra citar una frase contenida en su descripción de su visita al campus de la Universidad de California en Berkeley (1905):

"El nombre de Berkeley es aquel de un muy distinguido y estimado filósofo inglés a quien se le acredita de haber sido el inventor de la mayor



locura jamás gara- bateada por un cerebro humano, la del idealismo filosófico que niega la existencia del mundo material”.

Defensor de la tesis de la existencia de los átomos como constituyentes básicos de la materia, plantea la relación gnoseológica como un reflejo, en el cerebro del observador, de una realidad exterior con la cual interactúa. En su ensayo “Sobre el problema de la existencia objetiva de los procesos en la naturaleza inanimada” (c.f.[1, 2]) se puede leer:

“Decimos que el propósito del pensamiento ha sido fundamentar reglas para nuestras ideas tales que ellas puedan predecir nuestras futuras sensaciones. Este objetivo es alcanzado en gran medida si la experiencia ganada a través de complejos de sensaciones que conciernen nuestros propios cuerpos la aplicamos también a la interacción de complejos similares relacionados con los cuerpos de otros”

La íntima relación entre lo mental y lo físico nos es dado -según Boltzmann- en último término por la experiencia. Es importante hacer notar cómo sus conceptos acerca de la generación de las ideas se reencuentran hoy en el trabajo de destacados neurofisiólogos como Jean Pierre Changeux, quien ha abordado desde el punto de vista experimental y teórico los mecanismos de formación y evolución de los llamados objetos mentales.

Por otra parte, en Boltzmann se supera la visión de un átomo estático. El movimiento aparece íntimamente ligado a los átomos, uno no puede ser concebido sin el otro, o en otros términos, el átomo aparece como un devenir: el ser es aquello que deviniendo es. De aquí fluye la determinación múltiple de los fenómenos naturales y la causalidad queda reducida a una simple idealización.

“Algunos filósofos -dice Boltzmann- se quiebran la cabeza sobre el problema de si causa y efecto representan una conexión necesaria o bien si se trata de una secuencia accidental” ([1, 2]).

Uno puede sensiblemente preguntarse cuándo un fenómeno específico está siempre conectado con un grupo definido de otros, apareciendo así su necesaria



consecuencia, o bien, si esta agrupación está en ocasiones ausente. Pero, su ardiente defensa del movimiento, se nutre también de la Teoría de la Evolución de Darwin. En múltiples ensayos Boltzmann se refiere explícitamente a esta teoría, pero ella también se transparenta en su análisis de la evolución de las ideas.

"No debemos aspirar a derivar la naturaleza de nuestros conceptos, sino más bien adaptar los últimos a la primera. No debemos pensar que cada cosa se disponga según nuestras categorías o que exista algo como la más perfecta disposición: esto siempre será variable, simplemente adaptado a necesidades del momento. Incluso la división de la física en teórica y experimental es sólo una consecuencia de la división bipartita de los métodos que hoy se usan y esto no permanecerá así para siempre."

Del azar.

Una rápida mirada a la etimología de la palabra azar en Español nos muestra asociada a la voz árabe zahr (flor) de donde deriva az-zahr juego de dados así llamado porque el as se representaba con dicha flor. Hay registros de que el término azar para designar el juego de dados ya se usaba en España en 1283. Un sinónimo importante es alea de donde deriva aleatorio, la suerte, también asociado con el juego de dados. Otro sinónimo de importancia que devela una concepción profundamente diferente es la voz griega *stokhos* (objetivo, blanco en el juego de los dardos) de donde se derivó *stokhastikos*, que apunta bien, hábil para conjeturar y que generaría el adjetivo *estocástico* puesto en uso en Matemáticas en 1953).

El uso más familiar del término azar se refiere a la ocurrencia de un suceso inesperado, es decir, sin plan deliberado o si hay ignorancia absoluta sobre las condiciones determinantes de su ocurrencia.

De manera un poco más flexible, se puede también aplicar la denominación a un hecho que aparece en la intersección de dos cadenas causales independientes.



Así, podemos relativizar el concepto: un suceso es un hecho de azar o contingente relativamente a un contexto dado de investigación, si el enunciado que afirma su aparición no deriva de ningún otro.

Todas estas acepciones ya estaban presentes a principios del siglo XX cuando Poincaré expresaba en *Ciencia y Método* la idea de una *causalidad probabilitaria*. Según él, la noción de azar no es tanto debida a nuestra ignorancia, sino que más bien a una falta de apoyo empírico o experimental que permita abarcar una multiplicidad de causas y efectos posibles.

Es decir, los fenómenos naturales gozan de una determinación múltiple que extiende la relación causa-efecto expresada, por ejemplo, en la mecánica newtoniana. La causalidad no es la relación más general entre partes de la Naturaleza. Para algunos, entre ellos Popper, se trata de un principio de orden metafísico (sobre el cual él no toma partido):

"Yo no acepto ni rechazo el 'principio de causalidad'. Me limitaré simplemente a excluirlo como 'metafísico' de la esfera de la ciencia" (Popper [10], p.61).

El pensamiento dialéctico incorpora una categoría más amplia que la del mencionado principio de causalidad: la interdependencia, o conexión universal, del cual causa y efecto no son más que momentos, aspectos que la expresan de manera incompleta. Causalidad clásica y determinismo clásico son abstracciones que corresponden a condiciones ideales. Es sólo en los sistemas completamente aislados y muy simples que se pueden verificar las relaciones "lineales" de causa a efecto. Pero el objeto aislado es una idealización. Lo concreto está siempre en relaciones multiformes con su medio. Las cadenas de causa a efecto se entrecruzan y la interacción mutua crea efectos nuevos. La posibilidad ideal de aislar un fenómeno llevó a Pascal a introducir el concepto de sistema (cerrado). Ese concepto es apropiado para el análisis de un sistema mecánico aislado en la física newtoniana. Sin embargo la Naturaleza muestra que los sistemas cerrados se agotan en sí. Sólo un sistema abierto, en el cual se consideren dialécticamente ligados una parte y su relación con el conjunto de la Naturaleza, puede considerar adecuadamente la evolución de los fenómenos.



En el análisis del azar intervienen también otras dos categorías dialécticas: posibilidad y realidad. Leamos a Heisenberg a este respecto:

"En las experiencias sobre los fenómenos atómicos nos vemos enfrentados a cosas y hechos, a fenómenos que son tan reales como los de la vida cotidiana. Pero los átomos o las partículas elementales no son tan reales; forman un mundo de potencialidades más que un modo de cosas o hechos."
([8], p.216).

En esta opinión, enmarcada en un profundo idealismo filosófico y completamente opuesta a las posiciones de Boltzmann y Einstein, se separa la posibilidad de la realidad por una barrera infranqueable, aquella de la lógica formal. Por ese camino se abre la puerta a un indeterminismo contrario a la ciencia. La concepción de estas categorías en movimiento en cambio, las enriquece y permite explicar coherentemente la naturaleza de los fenómenos atómicos. La realidad del átomo es del mismo orden material que su propio movimiento, del cual es inseparable. Así, *lo real es lo posible realizado y lo posible es lo real que está en curso de transformación.*

Haciéndose cargo de otros debates históricos, una palabra debe ser dicha sobre la relación del azar con los conceptos de *necesidad y contingencia*. Para Demócrito nada se hace sin causa y todo es el producto de una razón y de la necesidad. Este fatalismo es consecuencia de la concepción mecanicista de la necesidad inmediata. El azar expresa la determinación múltiple de cada estado que se realiza en la Naturaleza. Corresponde a formas de la interdependencia e interacción universales cuyas leyes o regularidades reflejan la necesidad. Estas leyes son precisas, formalizables de manera específica. La contingencia, en cambio, corresponde a fenómenos que ocurren sin obedecer a una ley conocida hasta el momento de su realización. La repetición de tales fenómenos y la regularidades observadas en su desarrollo enriquecen la categoría del azar.

Las leyes del azar, descubiertas en el curso de un largo proceso histórico, han involucrado la evolución del conjunto del conocimiento humano. La primera de ellas, quizás la más conocida, que ha influido fuertemente en la filosofía empirista



de Hume, es la Ley de los Grandes Números, para la cual Jacob Bernoulli estableció un primer modelo matemático en el siglo XVII. Corresponde al "comportamiento promedio" y ha permitido construir una visión "frecuentista" de la probabilidad. La segunda familia de leyes se refiere al estudio de las fluctuaciones: las pequeñas variaciones y sus correspondientes modelos matemáticos referidos a diferentes "Teoremas del Límite Central"; las grandes variaciones, descubiertas durante el siglo XX, formalizadas en la Teoría de Grandes Desvíos. La tercera ley, que es la que nos ocupa en esta ocasión, fue descubierta por Boltzmann y expresa que *la complejidad de todo sistema dinámico aumenta en el curso de su evolución*, dado que no se puede concebir su movimiento separado del resto de la Naturaleza. La cuarta, fruto de las investigaciones en Física del siglo XX, entre otras, plantea que *toda observación de un fenómeno modifica tanto al objeto observado y a su observador*. La observación científica es la construcción de un nuevo proceso (observador-observado) en el cual el ser humano extrae información sobre la realidad, acrecentando su conocimiento. Sin ese acto de transformación de la Naturaleza no hay conocimiento posible. Hay una íntima relación entre la tercera ley y la cuarta, pues el concepto de sistema dinámico real debe ser abierto, es decir considerar el movimiento de una parte siempre en relación con el todo, de ahí que la observación naturalmente perturbe a la vez el objeto en estudio y al sujeto que la realiza, con el consecuente aumento de la complejidad.

El azar es en consecuencia una categoría de la realidad de la cual toda teoría de probabilidad no es más que un modelo matemático. La relación entre las diferentes teorías de probabilidad es función de cuán evolucionado sea el modelo matemático propuesto para el azar y sus leyes. De esta manera, por ejemplo, la teoría propuesta por Kolmogorov en 1933 permite sólo modelar coherentemente tres de las cuatro leyes del azar antes enunciadas. Por su parte, el modelo de von Neumann y sus derivados modernos, incluye a aquél de Kolmogorov y permite también describir la cuarta ley.

Evolución y complejidad.

La práctica científica transforma la naturaleza y porque la transforma, evoluciona también el cerebro de los hombres y progresa el conocimiento. Como observara Einstein ([5])



"Pero entonces, si la experiencia es el alfa y omega de todo nuestro saber en torno a la realidad, ¿Cuál es el puesto que la razón ocupa en la ciencia?.

Un sistema completo de Física Teórica se compone de ideas, de leyes fundamentales que deben ser aplicables a estas ideas, y de proposiciones que derivamos por deducción lógica. Son estas proposiciones que deben corresponder a nuestra experiencia individual; su deducción ocupa necesariamente, en una obra de teoría, casi toda la página"

Desde el principio de la historia el hombre ha buscado clasificar el conocimiento alcanzado y los distintos sistemas propuestos para ello condensan en sí el debate filosófico sobre la ciencia. Desde la perspectiva enunciada aquí arriba, una clasificación posible viene dada por un análisis de la *complejidad* de las transformaciones que la especie puede introducir en la realidad.

La complejidad de un acto de transformación de la realidad está relacionada con el número de interrelaciones involucradas tanto en el objeto como en el sujeto de él. Es sabido que el Padre Teilhard de Chardin explicaba el surgimiento del pensamiento por un aumento de la complejidad en la organización de la vida [11]:

"Esta Conciencia que llena, a nuestros ojos; las avenidas del Pasado, no corre, sencillamente, como un río que transporta, entre orillas diversas, un agua siempre parecida. Se transforma en el camino, evoluciona: hay un movimiento propio de la vida. Si seguimos ésta en sentido contrario al tiempo, la vemos atenuar la complicación orgánica de sus formas y el campo de su espontaneidad. Los sistemas nerviosos se hacen cada vez más rudimentarios. Y, a juzgar por los supervivientes actuales de estos estadios antiguos, el mundo animado se pierde en lo más bajo, en un hormiguero de partículas vivas, apenas emergidas de las fuerzas moleculares. Inversamente, los edificios celulares se construyen en el sentido de la flecha del tiempo; y paralelamente a una creciente complejidad la conciencia aumenta sus poderes de clarividencia interna y de interligazones, hasta que, al nivel del Hombre, aparece el pensamiento reflejo."



Desde otro ángulo, el de la filosofía materialista, Engels observa en [6] que lo que permite clasificar y analizar las relaciones de las ciencias entre sí es la constatación de que cada una de ellas estudia objetos y formas de movimiento de éstos, (que son ambas expresiones de la materia), cuya complejidad es diversa. De este modo se reproduce entre las ciencias el camino seguido en la formulación de las ideas en la mente humana, partiendo de una realidad independiente del observador. Así, por ejemplo, las ciencias sociales abordan objetos y formas de movimiento de los más complejos pues involucran la organización de la vida de los hombres en sociedad; luego, un poco menos complejos son los objetos y el movimiento analizados por las ciencias de la vida; siguiendo así, en el sentido de la disminución de complejidad, viene la química, la física, la matemática, la lógica; pero, el ciclo se completa con el retorno a la práctica, juez último de la teoría, y que se caracteriza por un progresivo aumento de los niveles de complejidad en los objetos y en su movimiento.

En todo lo anterior está en consecuencia la idea de que la complejidad expresa los distintos niveles de interrelación entre los fenómenos. Un ejemplo simple de cómo se modela matemáticamente la medida relativa de interrelaciones posibles, viene dado en la llamada "Teoría de la Complejidad". Un típico problema de esta área es cómo discernir entre dos algoritmos, (representados por máquinas de Turing), que permiten resolver un mismo problema, para saber cuál de ellos es mejor ya sea porque use menos recursos como tiempo o espacio de memoria. La complejidad computacional de A será mayor que la de B si cualquier instancia del problema requiere más pasos de resolución usando A que usando B.

Obviamente, desarrollar un programa de resolución de un problema determinado que tenga más pasos que otro procedimiento, representa un aumento en el número de interrelaciones. La definición de "más complejo que" adoptada en la Teoría de la Complejidad hace suya implícitamente la idea de que todo conocimiento involucra transformación y que una medida de ésta es también una medida de los niveles de interrelaciones que él genera.

Una forma coherente de abordar la complejidad viene dada por el estudio del azar según lo enunciado anteriormente, a través de una adecuada formulación de la tercera ley descubierta por Boltzmann. Al concebir un sistema de partículas en



evolución, su interacción con el medio así como su propia dinámica interna, generan grados crecientes de complejidad. El aumento de la complejidad no significa sólo aumento del número de constituyentes del sistema -que ocurre efectivamente en algunos casos como en los sistemas biológicos en que interviene la división celular- sino que, de manera más completa, refleja un incremento en las formas de interrelación. Es decir, para usar una imagen fácil, la complejidad aumenta por un incremento en cantidad, que se traduce también en un aumento en calidad.

Medidas de la complejidad. Complejidad y rupturas

Así como las probabilidades han sido introducidas con el fin de modelar matemáticamente el azar y sus leyes, la complejidad requiere también de conceptos matemáticos que capturen su esencia.

El concepto de *entropía* apareció en la Física introducido por Clausius durante el siglo XIX. Corresponde, según sabemos a una medida del "desorden" que presentan las moléculas de un gas y ha permitido dar cuenta de los equilibrios termodinámicos.

Por esta razón el tema ha sido estudiado con gran interés por quienes han tenido que pensar en una Teoría Matemática del azar. Muchos matemáticos célebres se preguntaron sobre la naturaleza del azar e intentaron formular modelos para él. Hilbert, en el sexto de los problemas que planteara a los matemáticos de este siglo en el Congreso Mundial de 1900, expresaba la necesidad de construir una teoría que unificara la Física y la Teoría de Probabilidades. Poincaré, se preguntó también sobre la naturaleza del azar sin poder responder. Kolmogorov, finalmente, dedicó su vida entera a la construcción de diferentes modelos matemáticos del azar. Al morir, en 1987, trabajaba en uno nuevo, precisamente relacionado con la Teoría de la Complejidad.

Se debe a Kolmogorov, Shannon, Kullback, entre otros, el desarrollo de modelos matemáticos para la entropía y la información, dando origen a la Teoría de la Información y la Teoría Ergódica. Estos conceptos han sido aplicados por



Chomsky, Eco y otros, en lingüística y semiótica [3], [4]. Eco, en particular, se refiere a la entropía en es- tos términos:

"La entropía se identifica con un estado de desorden, en el sentido que un orden es un sistema de probabilidades que se introduce en el sistema, para poder pre- ver su evolución. En la Teoría Cinética de los gases, se prevé que, en un recipiente dividido en dos sectores unidos por un paso, puede existir un aparato llamado demonio de Maxwell, que permita que las moléculas gaseosas pasen a un sector y las más lentas permanezcan en el otro: con ello se introduciría un principio de orden en el sistema y sería posible efectuar una diferenciación térmica. Pero en la realidad, el demonio de Maxwell no existe y las moléculas de gas, chocan- do desordenadamente entre ellas, nivelan sus velocidades respectivas creando una especie de situación 'media', que tiende a la igualdad de probabilidades: por ello se dice que el sistema tiene una entropía muy alta y no es posible prever la dinámica de una simple molécula".

La cita de Eco ([3], p.60), dejando aparte algunas imprecisiones probabilistas, con- tiene aspectos interesantes de destacar. En primer lugar, es muy apropiada la interpretación que adopta de la entropía para poder aplicarla al análisis del lenguaje. Para Eco la introducción de un *código* permite disminuir la entropía porque disminuye las posibilidades de interpretación "caótica" de un mensaje.

Dicho de manera más general, las posibilidades de interpretación en el lenguaje expresan la complejidad de un mensaje determinado, y la entropía asociada es una medida de esa complejidad.

Es ésa la naturaleza profunda del concepto de entropía, independientemente del modelo matemático que se adopte para representarla.

La entropía de un conjunto de transformaciones de la realidad mide el grado de complejidad del fenómeno analizado. Se relaciona en consecuencia con el propio desarrollo de la Teoría del Conocimiento, en la medida que ésta depende de tales transformaciones.



Pero entonces cabe preguntarse por mayores precisiones acerca de la forma en que la entropía se expresa en la generación del conocimiento. En aquellas ciencias en que el concepto ya ha sido introducido, la precisión es ociosa, pero, la tesis precedente contiene en forma implícita una propuesta de "exportación" del concepto de entropía y es legítimo que los científicos de esas áreas, se pregunten, suspicaces, cuál es la real ventaja de una tal noción. En realidad el aporte que la entropía puede hacer al desarrollo de la teoría del conocimiento está dado por las precisiones que permitiría entregar a *conceptos de reversibilidad e irreversibilidad, equilibrio y no equilibrio*, en suma, por su relación con las llamadas *demarcaciones o rupturas* en el desarrollo del proceso cognitivo.

Reversibilidad e Irreversibilidad; equilibrio y no equilibrio

En Física se acostumbra hablar de "estado de un sistema" y tal frase parece no generar problemas de interpretación a ningún científico.

Si no genera problemas de interpretación es quizás porque implícitamente asumimos una explicación *histórica* del mismo, vale decir, un "estadio del devenir de un determinado fenómeno natural", sin pretender entregar una *definición* lógico-formal de él. Si "estado de un sistema", en abstracto, no se define, sí estamos más proclives a hacerlo con el "cambio de estado", al interior de cada ciencia particular. Más aún, en distintas teorías calificamos algunos cambios de estado de "irreversibles" si una vez producidos resulta imposible retrotraer el fenómeno al estado anterior. Esto presupone, en particular, una dirección del tiempo en la evolución. Pero además exige precisar en cada caso nuevas *representaciones* (teóricas) de los sistemas en estudio.

Vayan algunos ejemplos para ilustrar el problema. Si un gas está encerrado en una cámara y ésta se abre, se escapa de la misma; el nuevo sistema que se genera tendrá que ser representado de otra forma. La larva que se transforma en mariposa, agota también una forma de representación.



En Termodinámica, se habla de un *proceso irreversible* si él deviene caótico, vale decir si su entropía aumenta indefinidamente. El sistema correspondiente parece alcanzar entonces un estado de *equilibrio*.

Pensemos lo anterior en función de la complejidad. Al abrir la cámara que contiene al gas, se añade complejidad al sistema. Asimismo, la mariposa es un organismo más complejo que la larva que la precedió. Ha habido ciertamente en este proceso, una discontinuidad, una ruptura, la emergencia del nuevo estado, "mariposa", desde el estado "larva". Desde ese punto de vista ha habido un aumento de la entropía. Pero, para poder describir ese aumento de entropía necesitamos imaginar "larva-mariposa" como un sistema que extiende al sistema "larva".

La evolución de la larva, que va asumiendo niveles de complejidad mayor cada vez, lleva asociada una medida de entropía. Llamémosla *local*. Y consecuentemente, tenemos una *entropía global* que permite analizar la complejidad en el sistema extendido. El paso de la larva a la mariposa (*emergencia*) se produce entonces cuando la entropía local alcanza su máximo valor. Esto determina un cambio cualitativo o *ruptura*, que implica un salto en la entropía global. Enseguida, la mariposa emergente, tendrá asociada una entropía local que irá variando y permitirá fijar los límites de *vigencia* de este estado.

Esto nos hace pensar que la irreversibilidad es un concepto relativo. Queda representado por el hecho de que la entropía local alcanza su máximo y se produce un salto en la entropía global. Así, una mariposa individual no puede volver a ser larva. Pero el ciclo larva-mariposa *sí es reversible*. De la misma manera, el gas que se escapa de una cámara, puede ser reinserto en ella si antes de abrirla se la rodea de un gran globo que se comprime una vez producido el escape de gas, pero eso requiere incorporar energía al sistema analizado.

En consecuencia, la descripción de cada estado necesita siempre de la determinación de su propia entropía local y de la entropía global asociada a la clase de fenómenos que se busca explicar.

En el estudio de un sistema, cada representación de un estado lleva asociada una medida de su complejidad propia (como representación) que



*llamamos entropía local. Pero, ésta se liga dialécticamente con otra medida, la entropía global, que describe el grado de complejidad del **conjunto** de estados posibles.*

Todo lo anterior supone intrínsecamente la idea de *evolución* o de una *dinámica*. La entropía local analiza la evolución de la complejidad en un fenómeno determinado, corresponde a la categoría del tránsito dialéctico del orden al desorden y del desorden a un orden más desarrollado. Pero, al mismo tiempo, una nueva relación dialéctica se genera entre el objeto real estudiado y clases más vastas de fenómenos. La entropía global da cuenta del aumento de complejidad de un conjunto de fenómenos naturales y de su interrelación con diferentes observadores humanos, en el curso de la evolución. (Corresponde a una medida de complejidad de la complejidad!). Ella tiende a aumentar de manera discontinua, siendo cada discontinuidad una *ruptura* del proceso evolutivo. Entre dos rupturas, la entropía local pasa cada vez desde sus valores mínimos a los máximos y expresa así el paso a la ruptura siguiente o, lo que es lo mismo, la reconstitución del orden a un nivel superior en la evolución. Resumiendo en términos de la dialéctica, el tránsito del orden al desorden y del desorden a un orden de características superiores en términos de la evolución de la complejidad, determina la entropía como categoría, la que a su vez lleva en sí la oposición de dos contrarios: la entropía local y la entropía global, que se definen por su relación mutua.

Enseguida, otro nivel de relaciones aparece al analizar la entropía en el desarrollo del conocimiento. El proceso del conocimiento progresa de manera discontinua. Las rupturas definidas por la entropía global corresponden a aquello que Fichant-Pecheux [7] siguiendo a Bachelard denomina "ruptura epistemológica" o punto de no retorno en la teoría (que también podríamos llamar *emergencia*). Por ejemplo, la llamada "ruptura Galileana" según la cual la Física no puede retornar a la concepción Aristotélica después de los descubrimientos de Galileo. Por otra parte, los posibles saltos de la entropía local, permiten caracterizar los llamados "puntos de demarcación" que en la obra antes señalada, no tienen explicación clara y que corresponden a posibles comportamientos reversibles entre dos rupturas.

En cada ciencia particular y en cada fenómeno por ella analizado, la categoría de la entropía local asume distintas formas y tiene asociada otros



conceptos. Es el caso de la entropía en Termodinámica que está ligada a la temperatura. No así en la Teoría de la Información, donde no se introduce la noción de temperatura. Por su parte la entropía global, puede tener también expresiones diversas, más aún, según la vastedad de los sistemas analizados, es posible que su expresión *escape* a una ciencia particular. Por ejemplo, en el caso del gas que ha sido devuelto a la cámara inicial, la entropía local no permitiría discriminar entre la situación previa (gas encerrado) y la última (gas liberado y vuelto a encerrar). Para ello es necesario observar la entropía global que toma en cuenta la *historia* del proceso. Esta determina la construcción de una nueva entropía local, que puede ser lograda con una representación matemática más compleja, que considere, por ejemplo, un espacio de estados que extienda el caso primitivo e introduciendo un nuevo proceso que describa el acto de devolver el gas a la cámara. De ese modo un *estado* del nuevo sistema se representa como un vector que considera los parámetros propios del gas (presión, temperatura, etc.) y además los que corresponden a la acción de devolver el gas a la cámara.

En la medida que tendemos a buscar representaciones cada vez más complejas de los estados, la entropía local aumenta al tender al equilibrio. Dicho de otro modo, el *equilibrio* (o estabilidad) es el orden reencontrado a partir del desorden. Corresponde al *máximo* valor posible de la entropía local y a un salto de la entropía global. Es la *mari- posa* que emerge de la larva; es el atractor alcanzado por la evolución de un sistema dinámico.

Por otra parte, hay también casos de sistemas que aparentemente alcanzan un estado de equilibrio, pero, sometidos a una pequeña perturbación, realizan una transición brusca hacia otro estado. Es un caso particular de sistema inestable. Tómese por ejemplo el caso de ciertas botellas de agua mineral, instaladas en un congelador, que al extraerlas de ahí se encuentran aún en estado líquido, mas al destaparlas se congelan bruscamente.... Este tipo de fenómeno se conoce con el nombre de *metaestabilidad* y está emparentado con otro, el de la resonancia, del cual hay versiones clásicas y cuánticas. La resonancia es bastante conocida en Acústica y en Mecánica. Es un poco menos conocida a nivel subatómico y fue un descubrimiento realmente sorprendente el de las partículas llamadas *hadrones*, cuya vida media es de segundos, y que son producidas por una gran concentración de energía efecto de una resonancia.



La aparición de estados inestables como los anteriores corresponde a valores *mínimos* de la entropía local después de un salto de la entropía global. Es el momento en que comienza el tránsito del orden al desorden.

Los fenómenos biológicos esconden sin duda múltiples medidas de su complejidad o entropías. El estudio de la estabilidad e inestabilidad de dichos sistemas se inscribe como un desafío actual para biólogos, matemáticos, físicos y filósofos.

Referencias

- [1]! L. Boltzmann. Populäre Schriften. Barth, Leipzig, 1905.
- [2]! L. Boltzmann. Theoretical physics and philosophical problems [partial English translation of Populäre Schriften], ed. B. McGuinness. Reidel, Dordrecht, 1974.
- [3]! U. Eco. La Estructura Ausente. Introducción a la Semiótica (2da.ed.). Ed. Lumen, España, 1981. 510p.
- [4]! U. Eco. Tratado de Semiótica General, (3a.ed.). Ed. Lumen, España, 1985. 513p.
- [5]! A. Einstein. Come io vedo il mondo. Universali tascabile Newton, Roma, 1985.
- [6]! F. Engels. Dialéctique de la Nature. Editions Sociales, Paris, 1971.
- [7]! Fichant-Pecheux. Sur l'Histoire des Sciences. Maspéro, Paris, 1969.
- [8]! Heisenberg. Physique et Philosophie.
- [9]! H. Maturana. Biología de la Cognición y Epistemología. Ed. Universidad de la Frontera, Temuco, 1990. 141p.
- [10]! K. Popper. The Logic of Scientific discovery.
- [11]! P. Teilhard de Chardin. L'Énergie Humaine. Ed. du Seuil, Paris, 1962.