

SOBRE UNA CLASE DE APLICACIONES DEL CONCEPTO TEORICO-FORMAL DE ENTROPIA

VICENTE VAZQUEZ - PRESEDO

Pitágoras enseñaba, hace ya unos veinticinco siglos, que las entidades matemáticas, los números, *las formas*, son la última sustancia en el fondo de nuestra experiencia perceptiva. Los antiguos de aquella fuente, incluyendo aquí especialmente a Platón y a Aristóteles, estuvieron siempre muy interesados en las relaciones entre forma y materia. Platón pensaba que la forma debía unirse a la materia para producir el objeto. De esta manera podía explicarse, por ejemplo, la reproducción como caso particular de una noción más general, según la cual cualquier objeto, es decir, cualquier *sistema*, es el producto de la unión entre materia y forma.

En lo que sigue consideramos ciertos cambios en las condiciones de sistemas materiales que se encuentran fuera del campo de la mecánica clásica; estos cambios pueden ocurrir espontáneamente o como consecuencia de la interacción entre diversos sistemas. El término sistema se usa aquí en el sentido de "conjunto de elementos materiales separados de todo lo demás por una superficie bien definida", de modo que los cambios en todo lo demás no afectan necesariamente las condiciones del conjunto.

Aunque la termodinámica se haya desarrollado considerablemente en el siglo pasado sin necesidad de contar con los detalles, digamos microscópicos, de la estructura de la materia, fueron muchos los físicos que, quizás a partir de los trabajos de Boltzmann, trataron de deducir leyes termodinámicas a partir de leyes mecánicas. El objetivo no parece haber sido logrado plenamente, pero la Termodinámica Estadística existe y se desarrolla. Por lo que sabemos, el segundo principio de la Termodinámica, en particular, es considerado hoy por muchos como una ley independiente *muy general* de la naturaleza.

El primer principio termodinámico implica que "la energía total de un sistema y sus inmediaciones debe mantenerse constante, aunque pueda cambiar de una forma a otra". Este primer principio se refiere a la existencia de cierta propiedad llamada *energía*, propiedad que se relaciona con el concepto de *trabajo*. Puede definirse esta propiedad de un sistema de modo que el cambio de su nivel entre los estados X_1 y X_2 es igual al trabajo A_{12} implicado por un proceso adiabático que tiene X_1 y X_2 como estados finales.

Si E_1 y E_2 son los niveles de energía de los estados X_1 y X_2 , entonces $E_2 - E_1 = -A_{12}$ (1). La definición de E es aquí sólo parcial, ya que el conocimiento de la diferencia no implica conocer los niveles E_1 y E_2 . Sin embargo, siempre podremos partir de un valor E_0 asignado a un estado de referencia X_0 . Además, como los trabajos son aditivos, la energía es una propiedad aditiva o extensiva.

El segundo principio implica que "es imposible llevar a cabo la conversión de calor en trabajo en forma continua sin producir cambios en alguna parte del sistema", o bien "que todos los procesos naturales o espontáneos, es decir, todas las transformaciones que se producen sin interferencia externa, son de carácter *irreversible*". Este principio, que distingue particularmente a la Termodinámica y que, por su trascendencia y generalidad, aparece tanto en las discusiones físicas como en las biológicas, o aun en las filosóficas, tuvo enunciados clásicos en las obras de

Clausius, de Planck y de Carathéodory. Todos estos enunciados se refieren a la existencia de un estado de equilibrio¹ estable para niveles dados de energía, de número de partículas y de restricciones.

Si un sistema se halla en un estado de equilibrio, éste puede alterarse como consecuencia de interacciones con el entorno. Pero existen varios estados de equilibrio, por ejemplo el estado de equilibrio estable, que no se altera respecto de interacciones que no dejan efecto neto alguno en el entorno.

De acuerdo con su naturaleza, a cada sistema corresponde un conjunto de estados posibles. El entorno, sin embargo, puede imponer restricciones de modo que sólo sean alcanzables algunos de ellos². Estos serán los estados "permitidos" por las restricciones.

Con estas definiciones, el segundo principio podría ahora enunciarse de este modo: "Entre todos los estados permitidos de un sistema, con niveles dados de energía, número de partículas y restricciones, uno y sólo uno de ellos es un estado de equilibrio estable". Este estado de equilibrio puede alcanzarse a partir de cualquier otro estado permitido del mismo nivel de energía, número de partículas y restricciones, sin efectos en el estado del entorno. Como consecuencia de la unicidad, el nivel de cualquier propiedad de un sistema en estado de equilibrio estable puede ser expresado como función de los niveles de energía, número de partículas y restricciones. Otras consecuencias del segundo principio se refieren a la existencia de procesos irreversibles y a la imposibilidad de una máquina que produzca trabajo neto a partir de un estado de equilibrio estable (imposibilidad de lograr movimientos perpetuos).

Dos sistemas estarán en equilibrio estable mutuo cuando el sistema combinado que pueden formar esté en equilibrio estable. Es fácil comprobar que para que esto ocurra, cada sistema debe estar también en equilibrio estable. Por otra parte, si los dos sistemas entran en contacto, sin restricciones para posibles interacciones, éstas no ocurrirán, salvo que se produzcan alteraciones en los estados permitidos de por lo menos uno de los sistemas. Supondremos en lo que sigue que uno de los sistemas es lo que se llama un *réservoir*³.

La combinación de un sistema cualquiera con un *réservoir* puede experimentar una "interacción de trabajo" con otro sistema. Este trabajo será $A_{12}(R)$ cuando el proceso es de carácter reversible y, por el segundo principio, estará determinado por los estados finales X_1 y X_2 . Cualquier A_{12} no podrá exceder $A_{12}(R)$ cuando ambos correspondan al mismo cambio de estado. LLamaremos *trabajo utilizable* a una propiedad que depende de los estados finales del sistema y cuyo cambio de niveles entre esos estados es igual a $A_{12}(R)$.

En símbolos,

$$(2) \quad (Z_2 - Z_1) \equiv -A_{12}(R).$$

Es evidente que se trata de una propiedad aditiva o extensiva.

1. Estado de equilibrio significa aquí un estado que no cambia en el tiempo mientras el sistema se encuentre aislado de los otros sistemas vecinos. A veces se confunde estado de equilibrio con estado estable. El estado estable no cambia en el tiempo aunque el sistema entre en interacción con otros sistemas.

2. Como ejemplo puede considerarse cierta cantidad de gas, con muchos estados posibles que se reducen, respecto del volumen, al ser encerrado en un recipiente hermético.

3. Los sistemas de esta clase satisfacen las siguientes condiciones: 1) son cerrados a la transferencia de masa; 2) sus restricciones (p. ej. volumen) son invariantes respecto del tiempo; 3) experimentan sólo estados de equilibrio estable; 4) en el curso de interacciones finitas permanece en equilibrio estable mutuo con un sistema idéntico que no experimente tales interacciones.

Tanto la energía como el trabajo utilizable son, como vimos, propiedades extensivas. Su diferencia será también, entonces, una propiedad extensiva. A partir de estas relaciones podemos definir la propiedad extensiva *entropía*⁴, cuyo símbolo será S. Un cambio de S, correspondiente a un cambio de estado, será igual al producto de una constante C_r por la diferencia entre los correspondientes cambios en energía y en trabajo utilizable, medidos respecto de un *réservoir* de referencia. En símbolos:

$$(3) \quad \Delta S \equiv C_r (\Delta E - \Delta Z).$$

Si asignamos un valor arbitrario a la entropía de un estado de referencia y, por lo tanto, a la constante C_r , a partir de (3) podremos calcular el correspondiente a cualquier otro estado disponiendo de medidas de E y de Z.

En todo proceso el incremento de entropía será nulo si es reversible y positivo si es *irreversible*. Si el proceso entre los estados X_1 y X_2 es adiabático, es decir que experimenta sólo interacciones de trabajo, entonces el trabajo realizado según la ecuación (1) será igual a la caída del nivel de energía. En un proceso adiabático *reversible*, según la ecuación (2), la diferencia entre la caída de energía y la caída del trabajo utilizable debe ser igual a cero. Según la ecuación (3), entonces, el cambio en la entropía será también cero. En general, para un proceso adiabático tendremos $\Delta S \geq 0$.

Según el análisis precedente, en un sistema aislado resulta imposible un decremento de la entropía. Y, como cualquier proceso en cualquier sistema puede ser considerado como incluido en un sistema aislado si incluimos en el sistema primitivo todos los otros sistemas con los cuales está en interacción, esta conclusión puede alcanzar una gran generalidad. Por ello se enuncia a menudo como "principio del aumento de la entropía". De acuerdo con este principio, en todos los procesos de la naturaleza, la entropía total de todos los sistemas afectados habrá de aumentar (o bien se mantendrá constante si se trata de procesos reversibles).

Existen varias interpretaciones del concepto de entropía, lo cual no puede sorprendernos, ya que se trata de uno de esos términos teóricos muy generales que aparecen en teorías diversas, como sucede con "equilibrio" o "estructura". Vimos ya que puede ser definida como medida de la capacidad de un sistema para producir trabajo en el futuro, pero es posible también interpretarla como una medida muy general de *desorden*, es decir, del estado más probable en que podemos encontrar a dicho sistema.

Las contribuciones de Clausius, Maxwell, Boltzmann y Gibbs, principalmente, permitieron elaborar una teoría cinética de las masas gaseosas donde la presión se vincula con la cantidad de movimiento de las moléculas que chocan contra una superficie⁵ y la temperatura absoluta con la energía cinética media de esas moléculas. Boltzmann introduciría, además, el concepto revolucionario de *probabilidad* respecto de una cierta distribución de los microelementos como factor determinante del estado macro. La entropía, cuya variación está relacionada con el sentido de las modificaciones macroenergéticas del sistema dado, tomaría en este contexto una nueva interpretación. Boltzmann mostró que ella sería proporcional, a menos de una constante aditiva, al logaritmo de la probabilidad de la distribución de los corpúsculos correspondiente al estado macroscópico considerado.

4. Clausius derivó la palabra *entropía* del griego η' $\tau\rho\sigma\pi\eta'$, "una transformación". Quería, hacia 1870, indicar con ella el "contenido de transformación" de un cuerpo, o de un sistema.

5. La presión (fuerza por unidad de superficie) tiene por *dimensión* $ML^{-1}T^{-2}$ y la cantidad de movimiento, por unidad de tiempo y de superficie, la misma. Cf. Vázquez-Preseado, V., *Lecciones de Economía Experimental*, cap. 2, Buenos Aires 1972.

Por ejemplo, consideremos un volumen de gas en un recipiente, con cierta temperatura. Sus moléculas siguen trayectorias aleatorias y chocan entre sí al azar. Este estado puede compararse con otro en el cual dicho volumen ha sido comprimido de manera tal que las trayectorias aludidas se han reducido notablemente. El primer estado puede describirse como de gran desorden y alta entropía respecto del segundo con mayor orden y más baja entropía. En este caso sería necesaria cierta cantidad de trabajo para llegar al segundo estado, pero también habría cierta probabilidad de que las moléculas se concentraran en un punto determinado del recipiente por la sola obra del azar. La probabilidad de que esto ocurra puede ser tan pequeña como se quiera, pero lo que nos interesa aquí es sugerir la existencia, para cada sistema, de diferentes estados, con diferentes probabilidades, con diferentes niveles de orden o desorden, en correspondencia con diferentes potenciales para realizar trabajo en el futuro. En este sentido *estadístico* la entropía de un sistema aparece definida por la igualdad

$$(4) \quad S = - \sum_{i=1}^{i=n} \log p_i$$

en la cual p_i representa la probabilidad de cada uno de los estados posibles del sistema. La suma alcanzará su máximo cuando $p_1 = p_2 = \dots = p_n$. Cuando esto ocurra se tendrá la más probable distribución de la energía del sistema.

El número de estados micro que corresponde a un estado macro dado determina la probabilidad de este último. Boltzmann descubrió que la entropía de un estado macro dado es *proporcional* al logaritmo de la probabilidad de dicho estado⁶. Cuando esa entropía llegue a su máximo no habrá más cambios espontáneos, es decir, no habrá más aumentos de entropía sin otros cambios en el sistema. El sistema habrá alcanzado un estado de equilibrio estable.

La interpretación de Boltzmann, de carácter estadístico, no sería aceptada sin resistencia por todo el mundo. El incremento de la entropía en los cambios irreversibles, espontáneos, ya no podía considerarse como una ley absoluta, "invariable" de la naturaleza. Un acontecimiento termodinámico inverso, que redujera la entropía en las mismas condiciones, no sería ya imposible, de acuerdo con el segundo principio, sino extraordinariamente improbable. No faltó quien rechazara las paradojas implicadas por la nueva interpretación.

Los nuevos desarrollos, en especial la moderna teoría cuántica, parecen, sin embargo, inseparables del concepto de probabilidad⁷.

Clausius creyó, en su tiempo, que la ley de entropía creciente no era sólo una ley universal sino también un principio que podía aplicarse al universo considerándolo como un sistema cerrado. Su conclusión implicaba que este universo nuestro tiende a caer en un equilibrio mortal donde la temperatura y, con ella, las otras variables termodinámicas, tenderían a un valor uniforme, cesando así todos los procesos naturales. Este modo de ver las cosas fue generalmente aceptado durante años.

Hacia 1930, algunas gentes como E. A. Milne comenzaron a señalar las dificultades lógicas de aplicar el concepto de entropía al universo considerado como un todo. Para ello partían de una condición fundamental requerida por el Segundo Principio: "Toda vez que un proceso tiene

6.- La introducción del logaritmo corresponde a la relación entre la aditividad de las entropías y la multiplicación de las probabilidades.

7.- De acuerdo con la formulación matricial de Heisenberg, $S = -k \sum m \ln y_m$, donde k es la constante de Boltzmann y la suma es una media de los logaritmos naturales de los autovalores de la matriz de densidad correspondiente al estado del sistema.

lugar en el universo es posible dividir a éste en dos porciones, de modo que una de ellas no resulte afectada por el proceso". Esta condición excluye inmediatamente la consideración del universo como un todo e impide medir un cambio en la entropía de este todo. Aunque siempre es posible realizar esta medición para sistemas cerrados, o aislados, con *algo* fuera de ellos, en este caso este algo no existe, el universo no tiene entorno, *ex hypothesi*.

Boltzmann, por su parte, creía que, en todo momento, el estado más probable del universo era el de equilibrio térmico pero no aceptaba las conclusiones mortales de Clausius por el hecho de que éste había pasado por alto la naturaleza estadística de la entropía. Creía en cambio también que siempre existirían regiones relativamente pequeñas, por ejemplo del tamaño de nuestra galaxia, donde serían posibles fluctuaciones espontáneas respecto del equilibrio. Más probables serían fluctuaciones del tamaño de nuestro sistema solar que hiciesen posible la vida, incluso la del observador.

Luego de su salto estadístico, el concepto de entropía sufrió otros desarrollos que ampliarían su campo de aplicación en varias direcciones. El origen de esos desarrollos puede remontarse a Maxwell y su *sorting demon*, hacia 1870, Maxwell se entretuvo en pensar qué pasaría si, en un recipiente dividido en dos partes A y B, con un orificio entre ellas, cierto ser allí encerrado abriera y cerrara el orificio de modo que las moléculas rápidas se juntaran en B y las lentas en A. De este modo, *sin trabajo*, subiría la temperatura de B y bajaría la de A, en contradicción con el Segundo Principio. Leo Szilard, en un escrito publicado en 1929, mostró que la contradicción era evitable si se tenía en cuenta que el "demonio de Maxwell" (que debe considerarse como parte del sistema cerrado al que nos referimos) hace uso de *información* respecto del movimiento molecular y convierte esta información en *entropía negativa*⁸. El próximo paso sería concluir, a partir del estudio de la difusión de los gases, que un aumento de la entropía implica pérdida de información.

Con estos antecedentes, Claude Shannon desarrollaría hacia 1948 una teoría estadística de la información muy general sobre la base de una medida del grado de libertad de que disponemos cuando construimos mensajes. El trabajo de Shannon sirvió también para reconocer que la analogía estadística del concepto de entropía creada por Boltzmann era la única que satisfacía las condiciones que podían exigirse a una tal analogía. A partir de las nuevas generalizaciones *entropía* pasó a medir, más bien que el grado de desorden de un sistema, el grado de incertidumbre (falta de información) acerca de la estructura de ese sistema.

Hasta este punto nos hemos servido de conocimientos decantados de la Física, y también de la Estadística en un sentido un poco más general que el que la define como "método para medir la incertidumbre de las conclusiones inductivas". Al hacer uso de esos conocimientos en Biología, en Ecología o, finalmente, en Economía, no sólo correremos los conocidos riesgos de reduccionismo sino que, incluso para evitarlos, disminuiríamos el rigor de las hipótesis y la precisión del lenguaje. Resta el posible enriquecimiento de los respectivos campos con nuevos conceptos que puedan iniciar en ellos un largo viaje.

Hemos mencionado ya en la nota 8 la importancia que cierta corriente moderna atribuye a la entropía negativa o negentropía en los procesos biológicos. En un organismo vivo existe un conjunto de procesos (físicos, químicos, etc. [no sabemos suficiente acerca del etc.]) que se encuentran "ordenados" de tal modo que el organismo perdura, crece, se desarrolla, se reproduce. Para lograr esto, el organismo se encuentra en permanente intercambio con su entorno, lo cual se expresa en el presente contexto diciendo que se trata de un *sistema abierto*.

8.- La importancia de la *entropía negativa* (negentropía) en los procesos biológicos ha sido señalada por Erwin Schrödinger. Los organismos vivos retardan su caída en el equilibrio termodinámico final por medio de su capacidad para mantenerse "en orden" absorbiendo entropía negativa de su entorno.

Los sistemas abiertos tienen como característica el hecho de intercambiar componentes con el entorno. Hasta hace relativamente poco tiempo, los conceptos termodinámicos se aplicaban sólo a sistemas cerrados. Las especulaciones acerca de la termodinámica de sistemas abiertos pueden ser consideradas como un intento de generalización hacia una *termodinámica irreversible*.

En ciertas condiciones, los sistemas abiertos pueden alcanzar un estado estable, distinto del equilibrio termodinámico ordinario, y capaz de producir trabajo. Estos sistemas mantienen su composición constante, a pesar de los procesos irreversibles que sufren continuamente, con entradas y salidas de elementos, destrucción y construcción. Cuando un sistema abierto alcanza su estado estable, éste es independiente de las condiciones iniciales. Este estado final puede ser alcanzado desde distintas condiciones iniciales y a pesar de perturbaciones en el proceso. Con esta característica de *equifinalidad*, los sistemas abiertos se mantienen en un estado de alta improbabilidad, de orden y de organización.

En un sistema cerrado, la entropía crecerá, como vimos, de acuerdo con la ecuación de Clausius $\Delta S \geq 0$. En un sistema abierto, el cambio en la entropía podrá escribirse

$$(5) \quad \Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2$$

El término ΔS_1 será siempre positivo, de acuerdo con el Segundo Principio ; ΔS_2 , en cambio, podrá ser positivo o negativo, de acuerdo con las propiedades "negentrópicas" que, en el caso de organismos vivos, explican la frase de Schrödinger: "el organismo se alimenta de entropía negativa".

Durante mucho tiempo, buena parte de nuestro siglo incluido, predominó entre los científicos una concepción positivista del mundo según la cual el último escalón empírico podía resumirse en la interacción ciega, de átomos o de partículas elementales. Para esta concepción, la vida resultaba un accidente particular de esa interacción y la cultura un epifenómeno. Aun sin considerar sus fundamentos metafísicos, las nuevas orientaciones nos hablan de "todos" irreductibles a la suma de sus partes, de "sistemas", de "estructuras", de "organización". El caso de los seres vivos tiene una frontera dentro del hombre, frontera que separa los objetos de la naturaleza de los objetos culturales. Las ciencias humanas o ciencias de la cultura se ocupan de un universo *simbólico* que rodea al hombre y lo influye en un intercambio que se suma al físico.

Frente a la evolución biológica de los seres vivos en general, evolución cuyo significado último estamos lejos de comprender, así como poco comprendemos el sentido último de la variable tiempo, encontramos en el hombre la evolución *histórica*. Y, como en las ciencias de la naturaleza ocupan un lugar central las leyes y las teorías, puede parecer natural que intentemos encontrar leyes históricas que pongan orden en los hechos históricos, o aun pensar que es posible desarrollar una teoría histórica que ponga orden también en el conjunto de las leyes descubiertas.

La actitud de los historiadores ha sido siempre más bien contraria a los intentos de introducir las categorías teóricas, especialmente las de las ciencias naturales, en su dominio, pero fueron quizás los filósofos, "teóricos de otras teorías", los responsables de las principales heterodoxias en este sentido. Cualquiera podría rastrear más lejos esta tendencia, pero las citas habituales se refieren a Vico, a Hegel, a Marx, a Spengler, o a Toynbee.

Este es el campo de los "grandes sistemas", del nacimiento y extinción de las grandes culturas, de la "macrohistoria", para llamarla de algún modo. Pero podemos considerar también campos y aspectos más limitados, "microhistóricos", donde sea posible hablar, por lo menos, de regularidades estadísticas, comenzando por los aspectos cuantitativos de la población misma, hasta llegar a los desarrollos tecnológicos, o al crecimiento económico.

Para Bertrand Russell "todo ser viviente es una especie de imperialista que trata de transformar todo lo que lo rodea en algo útil para sí mismo y para su semilla". En los términos que hemos definido, esto significa que cada organismo mantiene su propio orden creando

desorden en su entorno. Los organismos sociales crean también islas de orden, cada vez mayores, a expensas de un mar de desorden que surge a su alrededor. Esta manera de ver las cosas tiene aplicación entre individuos, entre grupos, *entre naciones*, y puede servir de punto de partida para comprender algunos aspectos de la historia, o bien de hipótesis en el dominio de las ciencias sociales.

Las islas de orden que intentan crear las tecnologías, incluso las económicas, en nuestro mundo, pueden ser defendidas con muchos argumentos, incluso fuera de los países industriales. El debate se plantea, sin embargo, cuando tratamos de evaluar sus *costos externos*, o bien, cuando tratamos de determinar quién debería pagarlos. A menudo estos costos pasan inadvertidos, por lo menos en el corto plazo, como ocurre con los efectos secundarios de algunos medicamentos. A los que se preocupan por los efectos de largo plazo de las tecnologías, en el contexto que acabamos de describir, se les llama "entropistas". Entre los entropistas destacaremos aquí a los discípulos neomaltusianos de Nicolás Georgescu-Roegen.

Georgescu-Roegen sostuvo, a comienzos de la década del setenta, que las transacciones económicas humanas conducen inevitablemente a alguna forma de entropía. Entropía debe entenderse aquí en el sentido amplio de "contaminación, disipación de recursos, desorganización social". El acento es puesto, sobre todo, en el campo de la energía. La energía aparece en todos los sectores, en el de los combustibles, en la extracción de minerales, en el procesamiento de los alimentos. Las consecuencias sirven de base a los argumentos de los partidos ecologistas: "se nos están acabando los combustibles fósiles"; fundadas en ellos, "nuestras tecnologías están destruyendo el medio ambiente".

Los entropistas más radicales cuestionan a todo el conjunto tecnológico moderno, el cual les parece, en último análisis, "monstruosamente centralizado, deshumanizante, ineficiente" y, en fin, antieconómico. Estos entropistas desearían volver a una sociedad basada en el uso de tecnologías que utilizaran energéticos renovables, con un sistema fabril descentralizado, donde todos los elementos fueran más pequeños, más cercanos a la biología humana, y donde se rechazara el crecimiento como un fin en sí mismo.

Los adversarios de estos puntos de vista no niegan la posibilidad de una "trampa de la entropía" en el largo plazo, pero no creen que las doctrinas ecologistas tengan mucha importancia "en los próximos veinte años". Los argumentos de esta corriente se refieren a las posibilidades de reparar los daños de las tecnologías con más tecnologías, a los beneficios más evidentes del crecimiento y al carácter inevitable de sus costos "tradicionales".

Pero en materia de costos del crecimiento puede hablarse en más de un sentido. Aquí nos interesan particularmente los llamados "crónicos" o "definitivos": son ellos los que se producen como consecuencia de un proceso *irreversible*. Un ejemplo conocido es el que refiere a la transición de una sociedad "primitiva" a otra donde predominan los intercambios onerosos. Para muchos, aunque el avance de lo costoso sobre lo gratuito pueda producir, en último análisis, una baja de los precios reales, es posible que la alteración cultural irreversible que la acompañe tenga un costo tan alto en términos de otros valores que nos despierte muchas dudas acerca del sentido en que orientaríamos la flecha del progreso. El bienestar *mensurable* según ciertas variables parece a veces aumentar, aunque lo haga dentro de una estructura humana más precaria que la original. El desplazamiento de poblaciones rurales hacia los centros urbanos puede seguir ejemplos más cercanos de este tipo de costos.

Si el crecimiento trae problemas, más trae el desarrollo; y ambos tienen costos de *desorden* que se manifiestan en nuestro tiempo histórico por medio de un efecto llamado *inflación*. Se han ensayado diversas explicaciones detalladas para ilustrar esta relación entre inflación y entropía. Como síntesis sustitutiva de algunas de ellas sugerimos volver a otra relación mencionada más arriba: al introducir el concepto de información, al definir su equivalencia con la entropía negativa, surgía como deducción inmediata que la entropía mide, de algún modo, el grado de

CONCEPTO DE ENTROPIA

incertidumbre acerca de la estructura de un sistema. Si el sistema al cual nos estamos refiriendo admitiera un nivel de precios variable y una estructura de precios relativos⁹, esta propiedad de la entropía podría transferirse sin rodeos a la inflación.

En un trabajo anterior, donde se analizaban las estructuras y el estructuralismo¹⁰, se concluía que para el punto de vista estructuralista interesa poco saber cuál fue, en definitiva, el impulso primitivo u originario de la inflación; una vez modificadas las respectivas estructuras el camino que tendríamos por delante sería un camino nuevo que está por crearse, no un camino viejo por el cual es posible volver al punto de partida. La incertidumbre concierne, precisamente, a los casos en los que la razón por la cual no podemos predecir un resultado está relacionada con el hecho de que ese resultado no ha sido observado nunca en el pasado y, en consecuencia, quizás represente algo *nuevo*. El concepto de irreversibilidad que hemos expuesto no es ajeno a este punto de vista, especialmente si sustituimos posibilidad por *probabilidad*, de acuerdo con la interpretación estadística de los procesos irreversibles.

La introducción del concepto de probabilidad extendió la clase semántica de la entropía desde los términos teóricos de la Termodinámica clásica hasta las propiedades formales de un concepto aplicable a un conjunto muy diverso de sistemas, físicos, biológicos, económicos. Esta extensión tuvo sus obstáculos, como hemos visto, y el propio concepto de probabilidad aporta los suyos en este sentido. Cuando los matemáticos se refieren a probabilidades piensan en Kolmogorov y en una teoría formal bien consolidada. Pero antes, o después, de esta teoría existen las diversas interpretaciones del concepto.

La interpretación frecuencial es la de mayor difusión en los niveles usuales de la investigación empírica, especialmente en el dominio de las ciencias de la naturaleza. Algunos autores, como Fisher y R. von Mises, atribuyeron a esta interpretación una legitimidad particular; otros, como J.M. Keynes, sostuvieron que la identificación de la probabilidad con la frecuencia estadística es "una grave desviación del empleo establecido de las palabras". Esto sería así "porque ella excluye claramente a un gran número de juicios que tratan de probabilidades". El sentido común parece indicarnos que los juicios de probabilidad están influidos casi siempre por algún conocimiento de frecuencias relativas pero, aunque la interpretación frecuencial atraiga naturalmente a los estadísticos profesionales y a los ingenieros, ella tiene el inconveniente de negar significación a la probabilidad del suceso único.

Las interpretaciones subjetivistas se refieren, en general, "al grado de firmeza que asignamos a una creencia", con mayor o menor independencia de los hechos. Entre una actitud "meramente psicológica" y una "absoluta fidelidad a los datos" existe un cierto número de posiciones intermedias que han dado lugar a importantes trabajos de justificación debidos a Savage, de Finetti y Shackle, entre otros. La dinámica particular de los sucesos sociales, la importancia que atribuimos en esta dinámica a las decisiones y a las expectativas explican el interés por las interpretaciones subjetivistas en este campo; explican también algunas dudas sobre el significado de las aplicaciones de conceptos como el de entropía en el dominio de los sucesos humanos.

9.- Cf. Vázquez-Presedo, V., *Economía, ciencia e ideología*, cap. 6, B. Aires, 1984.

10.- "Estructuralismo, estructura económica y otras estructuras", *Anales de la Academia Nacional de Ciencias Económicas*, B. Aires 1979.

Referencias

- [1] ALBERT, H., "*Theorie und Prognose in den Sozialwissenschaften*", Schweizerische Zeitschrift für Volkswirtschaft und Statistik, 93 Jg., 1957.
- [2] BERTALANFFY, L. von, *General System Theory*, N. York 1968.
- [3] CARATHÉODORY, C., "*Untersuchungen über die Grundlagen der Thermodynamik*", Math. Ann., LXII, 1909.
- [4] DE FINETTI, B., "*La prévision: ses lois logiques, ses sources subjectives*", Annales de l'Institut Henri Poincaré, vol. 8, 1937.
- [5] DUGAS, R., *La théorie physique au sens de Boltzmann et ses prolongements modernes*, Neuchâtel, 1959.
- [6] FRÉCHET, M. "*Sur l'importance en économétrie de la distinction entre les probabilités rationnelles et irrationnelles et irrationnelles*", Econometrica, XXIII, 1955.
- [7] GEORGESCU-ROEGEN, N., *The Entropy Law and the Economic Process*, Harvard U.P., 1971.
- [8] KEYNES, J.M., *A Treatise on Probability*, Londres 1921.
- [9] PLANK, M., *Vorlesungen über Thermodynamik*, Leipzig 1930.
- [10] PRIGOGINE, I., *Etude thermodynamique des phénomènes irréversibles*, Paris 1947.
- [11] SHACKLE, G.L.S., *Uncertainty in Economics*, Cambridge 1955.
- [12] VÁZQUEZ-PRESEDO, V., *Economía, ciencia e ideología*, B. Aires 1984.

Instituto de Economía Aplicada.
Academia Nacional de Ciencias Económicas.
Buenos Aires.

Recibido por U.M.A. el 16 de mayo de 1989.