

## La evolución de los paradigmas científicos: desde Galileo al 'caos'.<sup>1</sup>

Mariano Vázquez Espí

Madrid, 1996

### Índice

<b>El péndulo de Galileo</b>	<b>3</b>
Entreviendo los límites . . . . .	4
<b>El principio de energía mínima</b>	<b>4</b>
'Suma' de óptimos escalares . . . . .	5
Problemas vectoriales . . . . .	5
<b>Las leyes de la energía</b>	<b>6</b>
La ley de la conservación . . . . .	6
El coste de la velocidad . . . . .	6
Reversibilidad . . . . .	6
La segunda ley . . . . .	7
Entropía . . . . .	8
Dinámica y termodinámica . . . . .	9
<b>Termodinámica del desequilibrio</b>	<b>9</b>
La máquina térmica . . . . .	10
La Tierra y el Sol . . . . .	11
Comportamientos estacionarios . . . . .	12
<b>Lejos del equilibrio</b>	<b>13</b>
Darwin (y Lamarck . . . . .)	14
Caos . . . . .	14
Dinámica de poblaciones . . . . .	15
Consecuencias epistemológicas . . . . .	16
La máquina de cálculo . . . . .	17
Sistemas y procesos . . . . .	17
De nuevo, la Tierra . . . . .	18
<b>Consecuencias del nuevo paradigma</b>	<b>18</b>
<b>Referencias</b>	<b>20</b>

Si es que la arquitectura quiere conservar su vocación generalista, bien expresada en la concepción vitruviana de la arquitectura como "un círculo que abarca todas las ciencias", sus practicantes quedan obligados no sólo a conocer, también a emplear en los métodos y procedimientos de su arte, los paradigmas científicos de la cultura para la que ejercen. Respecto

<sup>1</sup>El origen de este texto fue una conferencia dictada en Lima en 1995, a miembros de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad Nacional Federico Villarreal, bajo el título *Nuevos y viejos paradigmas científicos*.

a esta cuestión, la situación actual de la arquitectura europea presenta profundas carencias.

En un lugar central está la especialización, uno de los valores exaltados por nuestra civilización. La teoría de los cuatro elementos (aire, agua, tierra y fuego) actúa como contexto esencial en el tratado de Vitruvio, contexto dentro del cual van situándose las explicaciones y argumentos sobre los diversos elementos de la arquitectura. Por el contrario, las propuestas teóricas de, por ejemplo, el Movimiento Moderno acusan un desfase notable respecto a las bases científicas de su época. Así, la "casa con respiración exacta" de Le Corbusier pertenece más al paradigma de la mecánica analítica del siglo XVIII (bien compilada en la obra de Laplace y otros) que a la termodinámica del siglo XIX (aunque ésta le preste el sustento técnico), mucho menos a los nuevos paradigmas del siglo XX. En descargo de Le Corbusier puede argumentarse que la creciente especialización en la ciencia y la técnica europeas impiden una rápida comunicación del saber entre las diversas disciplinas<sup>2</sup>. Pero, incluso así, no es posible explicar porqué entonces Le Corbusier y otros teóricos del Movimiento Moderno no renunciaron al tono generalista y global de sus propuestas. Pues recuérdese que la "casa con respiración exacta" era propuesta por todos los países y para todos los climas<sup>3</sup>: los llamados "muros neutralizantes" (dos láminas de vidrio entre los que circularía el aire acondicionado) permitirían mantener en el interior del edificio una temperatura constante de 18°. Esto exigía desde luego una casa hermética, la casa incapaz de relacionarse con el mundo exterior (ya fuera para defenderse o aprovecharse de sus condiciones); la casa en frente de, o contra, una *naturaleza dominada*. En definitiva, el paradigma cartesianiano con que había culminado el desarrollo de la ciencia racional inaugurada por Roger Bacon en el siglo XIII (ECO, 1985:235).

En vivo contraste debe recordarse que varias déca-

<sup>2</sup>El riesgo de la *superespecialización* parece empezar a conjurarse en parte debido a la aparición, en disciplinas muy diversas, de fenómenos con un mismo carácter: el del 'caos', véase por ejemplo Gleick, 1987.

<sup>3</sup>"At this time of general interpenetration of international scientific techniques, I propose one single house for all countries, all climates: a house with exact respiration." *Précisions*, Le Corbusier.

das antes de que Le Corbusier realizara sus propuestas, el físico vienes Ludwig BOLTZMANN (1905) había ya subrayado e intuido muchas de las consecuencias epistemológicas de las leyes termodinámicas del siglo XIX. En particular, el hecho de que toda teoría, en tanto forma estructurada de un flujo de información que recorre el observador y lo observado, no es más pero tampoco menos que una visión, una imagen; y como tal sólo una de las innumerables visiones posibles (cf. LIZCANO, 1993:74).

Este tipo de formulaciones no sólo surgieron en la física. Otros muchos pensadores, con suficiente sensibilidad, comenzaron a descubrir debilidades en la cimentación del edificio levantado por Descartes. Muy en particular lo arbitrario de la separación entre mente y cuerpo. Quizás una de las fórmulas más interesantes es la recogida en la semántica de Korzybski, resumida en la fórmula “el mapa no es el territorio” (cf. BATESON, 1972). El explorador, abstraído en la contemplación del mapa que tanto trabajo y esfuerzo le ha costado trazar, puede llegar a creer, como le ocurrió a Descartes, que está fuera del territorio, al extrapolar la evidencia de que está fuera del mapa. Pero para el observador que mira al explorador (sin haber participado en su ardua tarea de topógrafo) resulta evidente que en realidad tanto el explorador como el propio mapa pasean dentro y son parte del territorio mismo. El ser humano no puede enfrentarse con la Naturaleza por la simple y sencilla razón de que es parte de ella. De aquí surgen múltiples consecuencias, todas derivadas del estudio de la “proporción” vitruviana, que era la relación entre la parte y el todo. Una de ellas, en particular, merece ser resaltada: la parte no puede conocer completamente el todo; la parte no puede dibujar en su mente un mapa completo, fehaciente, exhaustivo del territorio (cf. STENGERS, 1983:41-42).

Se ve así que la propuesta de “dominar” la naturaleza recogida por el Movimiento Moderno era utópica en el doble sentido negativo de la palabra: por un lado ha resultado imposible y por el otro no era deseable. La propuesta además llegaba tarde, cuando ya existían instrumentos analíticos que podían haber previsto las disfunciones y fracasos del Estilo Internacional.

Si a lo anterior unimos la proliferación de supersticiones científicas en nuestros días, creo que puede comprenderse el interés de aclarar cual es la situación de la ciencia, tanto en lo que se refiere a sus métodos como a sus resultados.

La expresión “superstición científica” puede parecer paradójica y quizá conviene aquí dar algún ejemplo. En muchos libros, artículos o programas de televisión que versan sobre la actual crisis ecológica y temas afines pueden leerse expresiones del tipo “fulanito no respeta las leyes de la Naturaleza”. Por bien intencionado que sea el autor de frases semejantes (en general argumentando en contra de las disfunciones ocasionados por “fulanito”), este género de afirmacio-

nes no trabajan a favor ni del conocimiento ni, probablemente, de la cosa defendida. Por el contrario, introducen supersticiones aparentemente avaladas por la Ciencia con mayúsculas, esa poderosa religión actual que maneja uno de los mayores presupuestos del planeta (cf. STENGERS, 1983:40). En efecto, la frase anterior incluye una contradicción irresoluble.

Por un lado, si uno admite la existencia de leyes inmutables en la Naturaleza y a la vez admite que los seres humanos pueden elegir entre comportarse de acuerdo con ellas o contra ellas, debe concluirse que el ser humano queda *fuera* de la Naturaleza, extrañado y enajenado del mundo que le rodea, incluyendo en él su propio cuerpo como quería Descartes. Pero si es así, el programa básico de la Revolución Industrial, el *dominio* de la naturaleza, tiene sentido, y su crítica *no podrá venir* del incumplimiento de unas leyes, las naturales, que a fin de cuentas *no obligan* a la conciencia humana. (Probablemente entonces, toda crítica *ecológica* carece de interés: las promesas de una futura felicidad humana cuando, precisamente, la Ciencia y la Tecnología hayan resuelto todos nuestros actuales y *transitorios* problemas en la *dominación* de la naturaleza, podrían ser alcanzables.)

Por otro lado está la interpretación contraria, más acorde con las leyes “naturales” hoy comúnmente aceptadas. En esta segunda opción se admite igualmente la existencia de leyes inmutables (al menos provisionalmente), pero a la vez se reconoce que el ser humano es natural, parte de la Naturaleza, inseparable de ella y que, por tanto, su comportamiento (incluyendo el *libre albedrío*) no escapa —ni podría hacerlo— al cumplimiento de tales leyes. La afirmación acerca de la moralidad de “fulanito”, una vez más, carecería de sentido, pues entonces las leyes naturales no determinan un único comportamiento en los seres humanos (y tampoco en el resto de los seres). La libertad humana (pero también la del resto) reaparece así en el mundo de la física y de la antiguamente denominada filosofía de la Naturaleza. Dirimir la bondad o justicia de los comportamientos vuelve, entonces, al plano de la ética, de donde, desafortunadamente, fue exilada por los planteamientos racionalistas (cf. STENGERS, 1983:42-43).

El propósito de lo que sigue es subrayar algunos de los temas centrales de los paradigmas científicos desde Galileo hasta nuestros días, a fin de que alguien interesado pueda intentar una labor similar a la de Vitruvio en el siglo I aC: describir una vez más el programa arquitectónico pero abarcando como en un círculo al resto de las ciencias.

Conviene avanzar que la conclusión que cabe extraer de la evolución de los paradigmas científicos resulta fundamentalmente inquietante, en cierto sentido conmovedora. Mejor que intentar resumirla en una proposición filosófica abstracta prefiero incluir dos textos de la física moderna que, a mi entender, representan muy bien el núcleo del asunto.

El primer texto fue escrito por Werner HEISEN-

BERG (1955):

La expansión, ilimitada en apariencia, de su poderío material, ha colocado a la humanidad en el predicamento de un capitán cuyo buque está construido con tanta abundancia de acero y hierro que la aguja de su compás apunta sólo a la masa férrea del propio buque, y no al Norte. Con un barco semejante no hay modo de poner proa hacia ninguna meta; navegará en círculo, entregado a vientos y corrientes. Pero podemos añadir que el riesgo subsiste sólo en tanto el capitán ignora que su compás ha perdido la sensibilidad para la fuerza magnética de la Tierra. En el instante en que este hecho se pone al descubierto, una buena mitad del riesgo se esfuma, ya que el capitán que no quiere dar vueltas al azar, encontrará sin duda algún medio para determinar la dirección de su barco, podrá ingeniar una forma más moderna de compás insensible a la masa del buque o, en todo caso, podrá orientarse por las estrellas, como en antiguas épocas.

Adviértase que Heisenberg no alcanzó a examinar que ocurriría con la mitad restante del riesgo, bien relacionada con esa expansión material que, ilimitada en apariencia, se enfrentará a límites ciertos e infranqueables (cf. SERRES, 1977:32), tal y como pone de relieve el análisis de la economía neoclásica y de las leyes físicas (NAREDO, 1987).

El segundo texto que he seleccionado fue escrito con anterioridad por Sir Arthur Eddington en su obra *El hombre y la naturaleza* (cit. por HEISENBERG, 1955:128):

Hemos visto que cuando la ciencia ha llegado más lejos en su avance, ha resultado que el espíritu no extraía de la naturaleza más que lo que el propio espíritu había depositado en ella. Hemos hallado una sorprendente huella de pisadas en las riberas de lo desconocido. Hemos ensayado, una tras otra, profundas teorías para explicar el origen de aquellas huellas. Finalmente hemos conseguido reconstruir el ser que las había producido. Y resulta que las huellas eran nuestras.

## El péndulo de Galileo

Una de las obras fundamentales de Galileo lleva por título *Discurso y demostración acerca de dos nuevas ciencias*. En concreto se trataba del inicio de lo que hoy conocemos como la Resistencia de Materiales y la Dinámica. En realidad, como el propio Albert EINSTEIN (1952) indicó, la segunda ciencia que Galileo inaugura es la teoría de la relatividad, pues desde entonces queda formulado el principio de

inercia que constituye el grado cero, por así decir, de esa teoría (cf. FREEDMAN *et* NIEUWENHJIZEN, 1985; MARTÍN, 1991).

Interesa aquí, sobre todo, subrayar lo que separa a Aristóteles y los griegos de la nueva ciencia europea de Galileo y Newton. Para evitar complicaciones innecesarias y formulaciones algebraicas extensas recurriré a un ejemplo simple como es el del péndulo.

Como es bien sabido, sometido a un impulso, un péndulo oscila entre dos posiciones extremas. Se trata del mismo efecto que en un columpio infantil. La experiencia empírica indica que, sin impulsos reiterados, el péndulo acaba siempre por pararse en la posición central entre las extremas.

Aristóteles percibía el péndulo y su proceso de parada como el movimiento natural que todo cuerpo experimenta hacia el centro de la Tierra pero que, impedido en este caso por el cable o la cadena de la que cuelga el peso, resultaba en un movimiento retardado, dubitativo que, finalmente, concluía en la posición más cercana a aquella posición "natural" a la que tendía todo ente en el planeta. Nótese como Aristóteles, mediante una teoría que hoy no sería de recibo, alcanzaba a retener en su percepción ciertas características del *proceso*, en particular la quietud final del peso.

El cambio epistemológico realizado por Galileo consiste en construir una percepción del mismo experimento que conducía a consecuencias contrapuestas a la teoría cinética de Aristóteles. Experto mecánico, Galileo supo construir péndulos cuyas partes móviles sufrían pequeñísimos rozamientos, y en los que el tiempo que tardaba en pararse el peso aumentaba de manera extraordinaria respecto a los péndulos comunes, más toscos. Sin embargo, Galileo no consiguió construir un péndulo que oscilara indefinidamente con sólo el impulso inicial. A pesar de ello, Galileo *vio cómo* hubiera funcionado un péndulo semejante. Comparando las leyes de este movimiento abstracto e inexistente formuló relaciones y leyes que permitieron posteriormente a Newton, establecer las leyes de la gravitación universal.

Nótese que mientras Aristóteles percibió el fin del *proceso*, Galileo percibió su continuidad indefinida en un tiempo abstracto e imaginario (KUHN, 1962; GLEICK, 1987:47-48). Este nuevo paradigma dio lugar a lo que hoy denominamos mecanicismo. En síntesis, el programa mecanicista postulaba que todo proceso observable podía reducirse al comportamiento mecánico de partículas materiales sometidas a leyes inmutables. En teoría, bastaría con conocer la posición y velocidad de todas ellas en un instante dado como para poder predecir la futura evolución del sistema, o averiguar su pasado. De este modo el aumento del conocimiento humano permitiría el dominio predictivo sobre la Naturaleza, en el futuro<sup>4</sup>.

<sup>4</sup>El mecanicismo corriente concluía en el determinismo. Sin embargo, sin abandonar los principios de Newton la cuestión no está tan clara: en el modelo, muy habitual, de partículas

A efectos prácticos, y dado que una completa exactitud resulta inalcanzable, el principio se formuló en términos más humildes: un conocimiento suficientemente aproximado llevará a conclusiones suficientemente aproximadas. O también: pequeñas diferencias en los datos sólo acarrearán pequeñas diferencias en los resultados.

Desde luego, la primera afirmación del programa mecanicista (reducción y predicción del comportamiento mecánico) resulta paradójica: la visión mecanicista pretendía por un lado que la 'Humanidad' podría, mediante el conocimiento científico, dominar la Naturaleza, a la vez que, debido a la "predictibilidad" del comportamiento de todo sistema material (incluyendo a los seres humanos), eliminaba la posibilidad de la libertad y de la decisión. Esta contradicción había sido prevista por Descartes quien para resolverla postuló la separación entre el cuerpo y la mente, entre el espíritu y la materia, y este fue el modo de librar a la conciencia del destino inexorable y predecible (teóricamente) de la última (cf. Eco, 1968:235).

### Entreviendo los límites . . .

Conviene dejar claro que en las obras de Galileo y Newton quedaron sembradas las semillas de paradigmas y percepciones de muy distinto jaez, que surgirían como teorías andando el tiempo (cf. nota 4).

En Galileo, por ejemplo, encontramos quizá la primera formulación moderna de límites en la Naturaleza, límites que no dictan que puede hacerse, pero que proscriben sucesos fuera de ellos.

Esta misma idea de límite infranqueable queda bien resumida en la ley de los cuadrados y los cubos que le permitió afirmar con rotundidad que de existir los gigantes (que todavía figuraban entre las supersticiones científicas de la época) no podrían parecerse a nosotros: en efecto, al crecer de tamaño conservando la proporción, la resistencia del cuerpo humano (que depende de la sección de músculos y huesos) crece con el cuadrado, mientras que el peso crece con el volumen, al cubo; en algún tamaño, huesos y músculos colapsarían bajo el peso propio del cuerpo, encontrando su tamaño insuperable. Esta idea permite predecir, por ejemplo, los máximos tamaños alcanzables por formas estructurales construidas con materiales dados. Sabemos gracias a esa ley que, cualquiera sean los recursos materiales y energéticos, la técnica empleada o la inteligencia de los diseñadores, un puente colgante formado mediante cables de acero corriente no podrá superar los 10 km de vano. Estos tamaños insuperables pueden establecerse con facilidad y aún

---

esféricas que entrechocan elásticamente sin disipación de energía —un modelo muy preciso—, basta con considerar la posibilidad de que tres de las esferas choquen *simultáneamente* para que toda posibilidad de 'determinismo' en las ecuaciones resultantes se desvanezca, cf. Penrose (1989:219). El mismo género de problemas se ha apuntado en ecología, cf. Margalef (1995:69).

antes de un análisis detallado de la forma estructural, de manera que contienen información técnica de indudable valor práctico.

Sin embargo, quisiera resaltar aquí sobre todo su valor teórico: los seres humanos se encuentran con límites infranqueables que les rodean y que les sitúan *dentro* de la Naturaleza, la misma que el mecanicismo pretendía poder dominar.

## El principio de energía mínima

Las ecuaciones de la mecánica newtoniana, aquellas que permitirían predecir el futuro o averiguar el pasado de los sistemas físicos, no resultaron fácilmente resolubles. Buena parte de los desarrollos matemáticos del siglo XVIII tuvieron como objetivo su resolución práctica. Una de las piezas centrales fue el cálculo infinitesimal, en particular, la determinación de máximos o mínimos de funciones algebraicas, cuya formulación actual es debida en buena medida a Euler, el gran matemático alemán, y a su cálculo de variaciones.

Con el cálculo de máximos y mínimos se afianzó un nuevo paradigma que perdura vigorosamente en nuestros días, el principio de mínimo esfuerzo o mínima energía potencial. ¿Por qué se para el péndulo en la posición central de su trayectoria oscilante? Porque resulta ser la posición en que la energía potencial es mínima. La evolución de los sistemas físicos comenzó a percibirse entonces como un asunto de cálculo de mínimos de alguna magnitud física que, al igual que la energía, cumpliera un papel central en la descripción del sistema en estudio. En ocasiones en vez del mínimo, interesaba el máximo lo cual no introduce ninguna dificultad, habida cuenta de que el máximo de una función es el mínimo de su negativa. Así las cosas, se prefiere hablar de óptimo en un sentido general (indicándose mínimo o máximo cuando no resulte evidente). Los problemas se transformaron así en el problema de calcular óptimos y, en consecuencia, la optimización de funciones en un método general de resolver los problemas.

Desafortunadamente, para que el método de optimización suministrado por el cálculo de variaciones de Euler fuera aplicable, era necesario formular una ecuación matemática que representara fielmente el problema. Esto no era (ni es hoy) una tarea fácil, sencilla, ni en general abordable; de manera que las más de las veces una ecuación que fuera simple (para no complicar el cálculo) era adoptada como modelo (necesariamente parcial) del problema real, y la solución obtenida (en realidad una aproximación a la solución real) era aplicada. Sensato parece que hubiera sido retocar la solución antes de aplicarla, pues obtenida a partir de un *modelo* aproximado, era necesario un proceso inverso para acoplar la solución a la realidad del problema. Pero obtenida la solución mediante complicados procedimientos analíticos que-

daba tan revestida de un aura de perfección que fascinó las más de las veces a teóricos e ingenieros, y en particular a los economistas del siglo XIX (cf. STENGERS, 1983:54; GUERRIEN, 1992). Además la formulación práctica del mecanicismo citada anteriormente aseguraba que las discordancias serían pequeñas si la aproximación fue lo bastante 'buena'. En palabras de GLEICK (1987:16): "los cálculos del movimiento planetario eran tan precisos que la gente se olvidada de que se trataba de pronósticos" (cf. también IBÁÑEZ, 1993:23).

### 'Suma' de óptimos escalares

Merece la pena mencionar una propiedad bien conocida desde los tiempos de Euler: el óptimo de una suma de funciones no es, en general, el óptimo de ninguna de ellas considerada aisladamente. En consecuencia, la optimización como método de resolución de problemas *obliga* a adoptar un punto de vista global, en el que todos los términos que contribuyen a la suma que se quiere hacer óptima deben estar (aunque sea aproximadamente) incluidos. De no hacerlo así, el óptimo calculado no coincidirá en general con el óptimo buscado y, en consecuencia, la solución encontrada no resolverá el problema original<sup>5</sup>.

### Problemas vectoriales

Los métodos de optimización diferencial exigen que el problema pueda ser descrito mediante una función escalar única como la energía potencial en mecánica. Fuera de este campo el método resulta estéril. Sin embargo, muchos problemas de interés tienen un marcado carácter vectorial: se trata de hacer mínimas o máximas distintas magnitudes físicas expresadas en distintas unidades y por lo tanto inconmensurables entre sí.

Para entender mejor este carácter vectorial como contrapuesto a escalar, piénsese, por ejemplo, en una explotación minera<sup>6</sup>. Se trata de encontrar el procedimiento de extracción que haga mínimo el coste monetario del empresario a la vez que haga mínimo el número de accidentes laborales. Se trata de un vector con dos componentes, la primera es un costo expresado en unidades monetarias convenientes, y

<sup>5</sup> Algunos términos de la suma se omitían, en ocasiones, para simplificar los cálculos. Otra fuente de complicaciones era el número de variables de la función, lo que aumentaba extraordinariamente los cálculos y su complejidad. En no pocas ocasiones, también se simplificó este *otro lado* de la definición funcional, identificando *arbitrariamente* distintas variables conmensurables en una única. El espacio de búsqueda, el de las soluciones, quedaba así gratamente disminuido, aunque la solución óptima buscada bien pudiera haberse quedado perdida por el camino, con una consecuencia parecida: el valor óptimo de la *única* variable fruto de la identificación, bien pudiera no coincidir con el valor óptimo de cada una de las variables originales, véase un ejemplo sobre la escala óptima de la producción industrial en Estevan (1983:104-105).

<sup>6</sup> Un ejemplo antiguo en la literatura, cf. Kropotkin (1892:122-123), aunque aquí la línea argumental es más paralela.

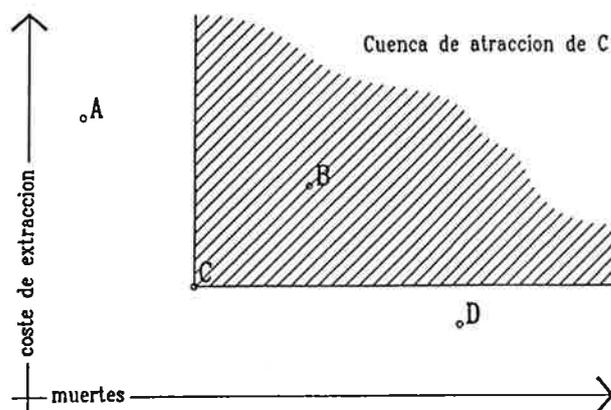


Figura 1: Problema de optimización vectorial.

la segunda, otro coste, expresado quizás en muertes anuales. Ambas magnitudes no pueden sumarse, del mismo modo que no pueden sumarse naranjas con manzanas.

Sin embargo, los procedimientos económicos corrientes, valorando las muertes en términos monetarios (vía el coste de los seguros o de las indemnizaciones o cualquier otro truco conveniente), suman ambas componentes del vector, que queda reducido a una única función escalar. Así la cosa, parece que la optimización diferencial puede aplicarse para la resolución del problema, es decir, para encontrar el procedimiento de extracción que haga mínimo ese coste acumulado de dinero y muerte humana. Pero sólo se trata de un espejismo: el teorema citado anteriormente nos indica que el máximo de esta nueva función escalar no coincidirá, en general, ni con el máximo beneficio empresarial (mínimo coste monetario) ni con el mínimo riesgo para los trabajadores. Sin embargo, el aparato matemático involucrado resulta lo suficientemente fascinante para el profano, como para que la idea de que la optimización diferencial podía resolver de un modo *objetivo*, en apariencia neutro, todo tipo de problemas —incluyendo aquellos de marcado carácter social y/o económico—, cobrara inusitada fuerza (de hecho se sigue empleando hoy con una frecuencia sorprendente, habida cuenta de lo incorrecta que es desde un punto de vista matemático).

En el problema minero, ¿cabe algún otro método mejor? En la figura 1 se han representado en el eje de abscisas el coste en muertes, y en el de ordenadas el coste monetario propiamente dicho. Cada punto en ese plano representa un procedimiento de extracción determinado, con un valor definido de ambos costes<sup>7</sup>; para todos los procedimientos se anotan los costes en los que hay que incurrir para extraer una cantidad dada de mineral. Lo singular del problema de optimar un vector, como en este ejemplo, reside en que se trata de un problema *indecidible* en un sentido formal. Sólo aquellos procedimientos con más coste para el empresario y más riesgo para los trabajado-

<sup>7</sup> Cuyo cálculo matemático exacto podemos *suponer* posible, por pura conveniencia.

res pueden reputarse de peores, como el B respecto al C. Técnicamente, B queda dentro de la 'cuenca de atracción' de C, tal y como se muestra en la figura; tal cuenca está formada precisamente por todos los posibles procedimientos *decididamente peores* que C. Sin embargo, no puede *decidirse formalmente* si B ó C son mejores que A ó D, puesto que ninguno de los primeros 'cae' en las cuencas de tracción de los segundos. Mientras que en un problema escalar puede asegurarse que existirá al menos un valor óptimo de la función (por complicada que ésta pueda ser), en un problema vectorial puede asegurarse lo contrario: *no existe un procedimiento objetivamente mejor*, tan sólo algunos *decididamente peores* que otros, y, en consecuencia, una pluralidad de procedimientos *no peores* entre sí (denominados habitualmente 'óptimos de Pareto', cf. GOLDBERG, 1989:197-201). El problema es formalmente *indecidible*<sup>8</sup>.

Para muchos pensadores del siglo XIX la respuesta a este problema era clara y evidente: la decisión sólo podría tomarse en una asamblea en la que los agentes del *proceso* asumieran sus propios riesgos: la explotación minera dejó de verse como un aparato mecánico de cuyo estudio analítico un técnico podría destilar el mejor funcionamiento posible. Por el contrario, la visión de un *proceso* y de soluciones *mejores* comparadas con otras *peores*, contiene sugerencias sólidas a favor de entender la evolución como un *proceso abierto*, que no cuenta con ninguna meta o punto de llegada, como hubiera sido el caso en la optimización escalar, donde el óptimo absoluto marca sin ambigüedades el punto de destino: el futuro es *indeterminado* en algún sentido preciso. Sin embargo, faltaban muchos años todavía para que esta verdad de perogrullo fuera reconocida *científicamente*. Y las decisiones en la mina se siguieron tomando "racionalmente", sorteando la indecibilidad matemática como mejor se pudiera.

## Las leyes de la energía

La optimización diferencial del siglo XVIII tomó como paradigma de función la energía potencial. De hecho, el concepto de energía tal y como hoy lo conocemos sólo se estableció en el siglo XIX, una vez se demostró la equivalencia de calor y trabajo mecánico.

Antes de analizar algunas consecuencias epistemológicas de las leyes de la energía, en definitiva de la termodinámica del equilibrio, convendrá repasar su formulación. Una vez más, para evitar complica-

<sup>8</sup>Salvo que pudiéramos encontrar un procedimiento con valor nulo para ambos costes. Sólo para este procedimiento especial (representado por el origen de coordenadas en la figura) la 'cuenca de atracción' sería el espacio completo de todos los procedimientos imaginables, de manera que estaríamos seguros de que cualquier otro sería peor que aquél, que sería en consecuencia el mejor de todos. Afortunadamente o no, la segunda ley de la termodinámica —que se examinará más adelante— descarta la existencia de tan deseable procedimiento de coste 'cero': aquí topamos con los límites de la Naturaleza (aunque por supuesto quedamos dentro de Ella).

ciones innecesarias usaré algunos experimentos físicos simples. De hecho, se tratará de un péndulo en el que se sustituye el cable de suspensión por una superficie de rodadura, sobre la que rueda el peso de forma esférica, véase figura 2.

## La ley de la conservación

La primera ley, la de conservación de la energía, postula que la energía no se crea ni se destruye, permaneciendo su cantidad total constante. La bola tiene antes de caer una cierta energía potencial, una capacidad de realizar trabajo útil (como es el caso del agua almacenada en una presa). Esta energía,  $P$ , es proporcional a la masa del cuerpo y a su altura sobre el plano de referencia ( $P = mgH$ , siendo  $H$  la altura,  $g$  la gravedad y  $m$  la masa). Si la bola cae, conforme pierde energía potencial gana velocidad, es decir, energía cinética. Más precisamente la energía cinética,  $C$ , es proporcional al cuadrado de la velocidad y a la masa del cuerpo ( $C = 0,5mV^2$ ). En consecuencia las funciones matemáticas empleadas asignan a cada *estado* —a cada posición de la bola— un valor de la energía, y de hecho se denominan por ello 'funciones de estado'.

## El coste de la velocidad

Un corolario interesante, de aplicación totalmente general, es que para duplicar la velocidad de un proceso se ha de cuadruplicar la energía potencial transformada —de  $C = P$  se tiene  $H = 0,5V^2/g$ : la altura necesaria crece con el cuadrado de la velocidad. En consecuencia, la velocidad tiene un "coste energético" acusado, de suerte que los mismos resultados *estructurales* pueden conseguirse transformando menos energía potencial pero empleando más tiempo, es decir, mediante procesos más pausados (sobre otros argumentos a favor de la *economía de la parsimonia*, véase, por ejemplo, MARGALEF, 1995:72).

## Reversibilidad

La energía cinética es máxima cuando la esfera rueda en el fondo del valle, donde la *pérdida* de energía potencial también lo es. ¿Qué ocurre con esta energía? Desde la óptica de la primera ley puede volverse a transformar en energía potencial: la esfera comenzará a subir la loma de enfrente perdiendo velocidad a la vez que gana altura. Al alcanzar la misma cota que tenía en la posición inicial su velocidad se anula, pues toda la energía cinética que tenía en el valle ha vuelto a transformarse en energía potencial. La esfera puede volver a caer para volver a subir y alcanzar la posición de partida: el ciclo se cierra. En teoría, el ciclo puede volver a comenzar y repetirse así indefinidamente.

Pero se trata sólo de la visión abstracta que del péndulo había conseguido Galileo. En la realidad, la bola, al igual que el péndulo, acaba por ir perdiendo

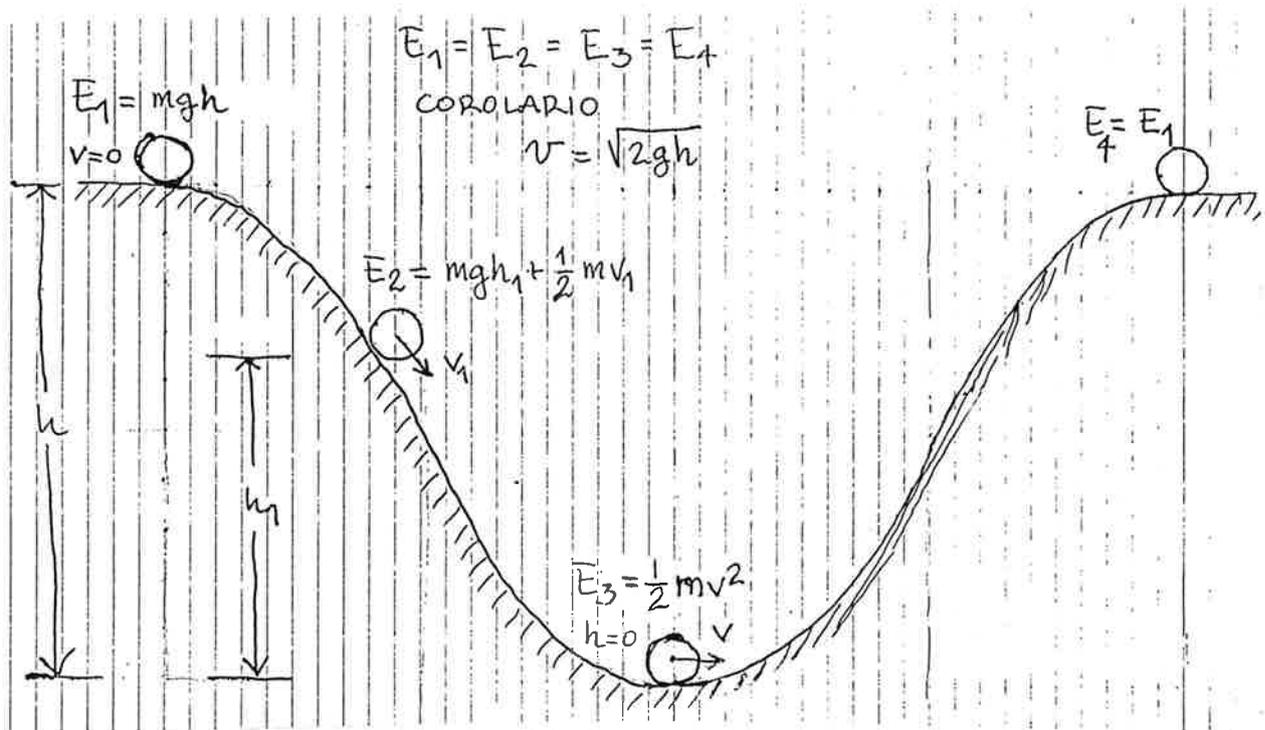


Figura 2: Esfera rodando por un valle.

energía —potencial y cinética—, hasta quedar varada en el fondo del valle. Si la primera ley tenía que defenderse faltaba por averiguar en que *otra* forma de energía se había transformado la energía perdida por la bola. Y ahí apareció el calor: al rodar por la superficie, la bola roza con ella calentándose ambas. El calor producido cierra el balance, de manera que tras un número más o menos grande de ciclos, toda la energía potencial inicial queda convertida en calor.

Esta formulación de la primera ley arreglo dos problemas pendientes de la física: la unificación del concepto de energía (hasta entonces sólo intuitivo) y la definición del calor (considerado hasta entonces un suerte de fluido, denominado calórico). Mientras que la altura mide la energía potencial y la velocidad, la cinética, la temperatura “mide” el calor, aunque aquí la relación entre temperatura y energía cinética rara vez es lineal: no hay proporción aritmética o geométrica. Con todo se conserva la *monotonía* de la relación: a más temperatura, más calor<sup>9</sup>.

<sup>9</sup>Los ‘cabos sueltos’ de esta descripción coloquial disminuirían tras la versión de la mecánica estadística. Ahora sólo se tienen dos tipos de energía, la potencial dependiente de la posición, y la cinética, dependiente de la velocidad, pero el objeto de estudio es un gran conjunto de partículas. La energía del conjunto es la suma de la de sus partículas. Para un observador estadístico o termodinámico, la energía total puede o no ser visible: si todas las partículas se mueven con igual celeridad y rumbo, el observador verá al conjunto moverse. Pero sí por el contrario, cada una de las partículas tiene su propia celeridad y rumbo, sin correlación con el resto, cabe en lo posible que la velocidad media del conjunto sea nula y, en consecuencia, el movimiento inobservable, ello a pesar de que la energía cinética no lo es. Los términos clásicos de la energía corresponden a las sumas de energía potencial y cinética correspondientes a posiciones y velocidades correlacionadas, aquellas que pueden ser observadas como movimientos. Por el contrario, las sumas debidas a posiciones y velocidades incoherentes forman

## La segunda ley

El panorama dibujado por la primera ley era bastante preciso: la energía adoptaba distintas formas y la transformación entre ellas era posible.

Que la bola que inicia sus ciclos de caídas y bajadas o que el péndulo que oscila acaben quietos y parados habiendo perdido energía potencial y ganando calor nos resulta natural, pues todos hemos tenido experiencias análogas. Pero ¿podrá transformarse el calor así generado en energía potencial? Es decir ¿podrá el calor “concentrarse” de alguna forma sobre la bola y elevarla de nuevo a la posición de partida? Nótese que hablo de exactamente la misma cantidad de calor, aquella que corresponde a la energía potencial inicial. Supongo que nadie habrá visto nada semejante. Tal parece como si las transformaciones entre las diversas formas de la energía siguieran una senda preferente, un sentido único: de manera espontánea un peso puede caer, pero no puede levantarse. Esto es ya de hecho la segunda ley de la termodinámica. En una de sus muchas formulaciones reza así: “es imposible transferir calor de un punto frío a otro ca-

parte de la energía térmica. Desde esta óptica, ni el calor ni el trabajo son formas de energía, sino formas de transmitirla, el primero en forma incoherente, el segundo de forma totalmente coherente, véase Atkins (1984). Coloquialmente ‘calor’ tiene un doble significado que puede inducir a error: por una parte, la suma de la energía debida a posiciones y velocidades al azar; por la otra, la transmisión al azar de la energía. Pero esta polisemia está tan aceptada que sólo queda recomendar cuidado y precaución en la lectura: muchas paradojas se diluyen con sólo darse cuenta de este doble significado. La distinción entre las escalas microscópica y macroscópica, por otra parte, cobraría especial significado en la teoría del caos, dado que en los sistemas ‘caóticos’ existe una suerte de ‘comunicación’ entre ambas escalas, véase Gleick, 1987:254 y ss.

liente sin realizar trabajo mecánico adicional". La energía tiene, en consecuencia, un sentido de transferencia privilegiado, descendiendo por el gradiente de alturas, velocidades y temperaturas. Este hecho permite calificar las distintas formas de la energía: la energía potencial, aquella que tienen los cuerpos en virtud de su posición en el contexto, puede convertirse en cualquier otra forma de energía espontáneamente, y en consecuencia es la forma de alta calidad o de mayor utilidad. Espontáneamente y sin esfuerzo adicional permite realizar trabajo útil. Por el contrario, el calor, transferido espontáneamente de los puntos calientes a los fríos (nivelando y anulando los gradientes espaciales de temperatura), no puede emplearse o transformarse en trabajo útil de manera espontánea: el calor se dispersa. Si se desea reunir calor para transformarlo en trabajo útil, ha de realizarse un considerable esfuerzo adicional (con la consiguiente transformación de energía de alta calidad) para recolectarlo, concentrarlo y conseguir algún propósito (tal es el caso de los combustibles). El calor es la forma degradada de la energía, la de más baja calidad.

## Entropía

Conviene examinar el manejo matemático de la segunda ley. Como vimos, el principio de mínima energía potencial podía ser manejado con comodidad mediante la optimización diferencial, debido a que una función, la energía, podía ser definida para el objeto en estudio. Encontrada la configuración o *estado* del objeto correspondiente a su valor mínimo, podía predecirse la posición final, estable o de equilibrio, del objeto en su contexto.

¿Existe alguna otra función potencial asociada a la segunda ley que pueda manejarse del mismo modo? Tal función es precisamente la entropía, una abstracción matemática al igual que la energía. Su definición sólo se construyó con cierto rigor tras cerca de cincuenta años de investigaciones sobre la naturaleza de la materia, mediante la disciplina denominada mecánica estadística. Las bases fundamentales de la definición son dos: la ley de la conservación de la energía, en primer lugar, y el azar, en el segundo. El azar interviene aquí en el axioma que reza: "lo más probable sucederá"<sup>10</sup>.

Una definición coloquial, admitida por lo común, que recoge lo esencial del concepto (pero desafortunadamente no todos sus detalles) identifica la entropía de un sistema aislado con su grado de incertidumbre *para el observador que lo contempla*: un sistema tiene más entropía cuanto mayor es nuestra incertidumbre sobre él o, lo que es lo mismo, cuanto mayor es la cantidad de información que debemos obtener para describirlo *con exactitud y en todo sus detalles*<sup>11</sup>.

<sup>10</sup>Desde luego es una tautología, una verdad de perogrullo: precisamente por ello es un axioma, cf. Scrces, 1977:29.

<sup>11</sup>En muchísimas ocasiones, se ha intentado relacionar tanto la entropía como la incertidumbre con el *desorden*; pero sin embargo existen bastantes obstáculos para que tal identi-

Para que esta definición coloquial tenga alguna utilidad debe advertirse que el sistema en estudio debe observarse como una totalidad y describirse en todos sus detalles. Veamos algún ejemplo. Considérese de nuevo la bola que cae por el valle hasta quedar parada en él y la siguiente descripción del sistema en su estado inicial:

Supóngase por conveniencia que inicialmente la esfera y la superficie están en el cero absoluto de temperatura, es decir, que no existe energía térmica alguna. La única energía es la potencial debida a la bola encaramada en la cima.

Lo que acabo de decir representa esencialmente la información que necesito transmitir para eliminar la incertidumbre acerca del estado del sistema al que me refiero. En consecuencia, este conjunto de fonemas son *de hecho* una medida coloquial de la entropía inicial del sistema.

La bola ahora cae e inicia sus ciclos amortiguados de caídas y bajadas. Finalmente queda varada en el fondo del valle y tanto la bola como la superficie se han calentado debido al calor, que se disipa hasta que una temperatura uniforme *no nula* acaba por instalarse en todas partes. Este es el final.

¿Qué información necesito dar para describir este estado final del sistema? En una primera y errónea interpretación de la definición coloquial anterior parecería que basta con la misma descripción que di para la posición inicial pero cambiando la situación de la bola, que ha pasado de la cima al fondo del valle. Pero con ello sólo describo o informo de lo necesario para calcular la energía potencial y la cinética. De actuar así, estaría olvidando el hecho de que ahora hay energía térmica, con el efecto de todos los átomos están vibrando alrededor de sus posiciones de equilibrio, y aunque inapreciable a simple vista, las superficies se hallan en continuo movimiento. Para describirlas con exactitud tendría que especificar en cada instante la posición exacta de cada una de las partículas involucradas y dado su enorme número esto me llevaría una inimaginable cantidad de tiempo (incluso admitiendo que tal cosa pudiera en realidad hacerse). De este modo la información necesaria, y por tanto la incertidumbre y la entropía, ha aumentado de manera colosal. En estos términos podemos

definición sea totalmente satisfactoria. En primer lugar ¿qué es el 'orden'? Si por 'orden' se entiende la coherencia del movimiento de un conjunto de partículas (la igualdad entre el valor medio de la velocidad en el conjunto y el de cada una de ellas) la identificación puede realizarse sin ambigüedad —este es el punto de vista de Penrose (1989:386) quien habla expresamente de *orden manifiesto*. Desafortunadamente, como 'ordenadas' se entienden muchas otras formas, fuera del estrecho margen de la visión estadística, y de la espectacular polisemia resultante para 'orden' pueden surgir muchos equívocos (cf. Escolotado, 1993:37; López, 1993:102 y ss.). Un análisis sucinto y elegante sobre la cuestión puede verse en Arnheim (1971). Algunas dificultades prácticas del concepto de 'orden' a propósito de la teoría de estructuras mecánicas pueden verse en Vázquez (1994:33,129). Por mi parte, en la medida de lo posible, prescindiré de utilizar 'desorden' como sinónimo de entropía o de incertidumbre.

reformular el segundo principio diciendo que en un *sistema aislado* la entropía aumentará y alcanzará en el equilibrio un valor máximo.

El ejemplo anterior es simple pero algo artificioso. Para un ejemplo más natural (y que de hecho pueden realizarse en una cocina doméstica) considérese una caja hermética y transparente que contiene dos vasos: uno contiene agua destilada y el otro una solución saturada de azúcar (cf. SCHRÖDINGER, 1944). Durante el experimento la temperatura permanecerá constante y por tanto podemos ignorar la *información* necesaria para describir la energía térmica, pues sería la misma antes o después y no hace ninguna *diferencia*<sup>12</sup>. Si se espera un número suficiente de días se observa que el vaso de agua destilada se ha vaciado casi en su totalidad, mientras que el fondo del recipiente aparece lleno de agua. Podrá comprobarse además que se trata de agua dulce, prácticamente tan dulce como la del vaso con la solución (que permanece lleno). ¿Por qué ocurre así? Aunque existen muchos modos de explicar el fenómeno, el más simple es la segunda ley. En el estado final del sistema tengo que decir que hay azúcar disuelta tanto en el vaso como en el fondo del recipiente de manera que la información que debo dar ha aumentado de manera considerable. De hecho, al principio tenía la seguridad de que todo el azúcar se encontraba en un vaso; ahora al considerar cada molécula individual tengo la incertidumbre de dónde se encontrará: en el vaso o en el fondo del recipiente. En la situación inicial el azúcar está “localizado”, “guardado” en uno de los

vasos, mezclada con la mitad del agua. Al final casi todo el agua ha conseguido mezclarse con el azúcar, de manera que la certidumbre inicial ha desaparecido, la incertidumbre ha aumentado y con ella la entropía. Tal es la tendencia inexorable en cualquier *sistema aislado*, sin intercambio de energía y materia con el contexto.

## Dinámica y termodinámica

La revolución epistemológica del segundo principio tiene, al menos, dos aspectos importantes.

En primer lugar, los procesos suceden espontáneamente en un sentido y a la entropía se la ha denominado, en consecuencia, la “flecha del tiempo”. Este tiempo no es consecuencia del destino sino del azar. Los procesos, en consecuencia, son irreversibles y la historia y el tiempo sensible reentran en el universo de la física (cf. MARGALEF, 1995). De hecho, podemos definir ahora el futuro sin ambigüedad: el futuro es el sentido del flujo del tiempo que aumenta la entropía (PRIGOGINE *et* STENGERS, 1984:117–122). Qué el futuro permanezca *abierto* mientras que el pasado se nos aparezca como completo no sería sino la lógica consecuencia del continuo aumento de nuestra *incertidumbre* sobre la Naturaleza<sup>13</sup>.

Por otro lado, la medida de la entropía requiere un proceso de observación que involucra intercambio de información y que muy difícilmente puede entenderse sin el observador en forma de conciencia o proceso mental. Además, el cálculo de la entropía exige la consideración de los objetos en su contexto, y en el contexto del contexto, recursivamente, hasta haber descrito todos los detalles (todas las formas de energía) y haber considerado el contexto más amplio, en donde el sistema en estudio puede ya considerarse como un sistema aislado. De este modo, el observador (nosotros mismos) reentra también en el mundo de la física y en la Naturaleza, y el concepto de ley objetiva, abstracta, ahistórica sufre un serio descabro (al que seguirán varios otros con el advenimiento de la mecánica cuántica y otros nuevos experimentos y teorías).

## Termodinámica del desequilibrio

La segunda ley puede enunciarse de manera coloquial diciendo que la energía siempre se transforma perdiendo calidad, degenerando en calor, de manera que la entropía alcance su máximo. Para un sistema aislado como el péndulo, la segunda ley anuncia que inevitablemente se parará y que el calor disipado quedará distribuido uniformemente. Pensando en el uni-

<sup>12</sup>A mi entender, la información como *diferencia* en el sentido en que emplea la palabra Bateson (1972) tiene poco que ver con la información como medida de la incertidumbre, véase una discusión detallada en Qvortrup (1993). En un sentido preciso, interviene aquí el mismo género de polisemia y confusión que arrastra consigo, como una dura condena, la palabra ‘orden’. El propio ejemplo puede servir para intentar arrojar algo de luz sobre la cuestión: la información (incertidumbre) sobre la energía térmica no hace ninguna diferencia en el tiempo, y en consecuencia no aporta información (significado) para la cuestión que estoy tratando (el *contexto*). Puedo prescindir de esa información (incertidumbre) porque no tiene información (significado). Debe recordarse que la información como incertidumbre alcanzó cierto *status* conceptual a partir de la “teoría de la comunicación” de Shannon. Sin embargo *no se trata* de la ‘información’ habitual: “Las líneas de comunicación y las transmisiones de radio transportaban cierta cosa [...] y la cosa no era *conocimiento* ni *significado* [...] Sería o no sería una insensatez, pero [con esa teoría] los ingenieros y los matemáticos tenían la posibilidad de medirla, transmitirla y comprobar lo correcto de su transmisión. ‘Información’ fue un nombre tan bueno como cualquier otro...” (Gleick, 1987:254, la cursiva es mía). Debe advertirse además que lo que Shannon denominó “información” era en realidad la *diferencia* entre la incertidumbre (entropía) antes y después de *obtener* algún conocimiento (Vivar, 1996); sin embargo, sus divulgadores han identificado habitualmente información e incertidumbre (¡compárense las fórmulas matemáticas!), convención que se emplea en el texto. El concepto de entropía en tanto información (entendida como incertidumbre) tienen su fundamento en la visión estadística de la mecánica, una ‘visión’ de la que resultan serias limitaciones, véase Stengers (1983:48): se contempla al sistema y a sus posibles configuraciones y estados, concediendo *a priori* igual probabilidad a todas ellas, sin que se analice el *proceso* por el cual cada configuración es alcanzable (si es que lo es). En lo que se refiere a la importancia que cobró el problema del ‘significado’ tras el teorema de Gödel, véase por ejemplo Penrose (1989:144,152).

<sup>13</sup>Lo que al menos en un primer vistazo contradice la versión habitual que sobre la situación se propaga por los medios de la publicidad: ‘los grandes logros de la Humanidad’, ‘el avance científico y técnico’, ‘el nivel de conocimientos alcanzados’, etc.

verso como un sistema aislado, la segunda ley adquiere un tono lóbrego y pesimista: con el correr del tiempo, toda la energía útil se habrá convertido en calor, toda diferencia de temperaturas se habrá anulado y todo movimiento habrá cesado<sup>14</sup>. Este desalentador espectáculo se denominó “la muerte térmica del universo”, y es su posición de equilibrio final, de máxima entropía<sup>15</sup>. Sin embargo, el universo es algo demasiado grande para los objetivos que me interesan aquí. Además no vivimos en sistemas aislados. Por el contrario cualquier sistema arbitrariamente definido (cualquier porción del mundo que habitamos) transfiere con su rededor cantidades considerables de energía y materiales. Por ello, interesa avanzar más allá de la termodinámica de los sistemas aislados, de la termodinámica del equilibrio<sup>16</sup>.

## La máquina térmica

Con casi cien años de anterioridad a la visión estadística y microscópica de Boltzmann, Gibbs y Maxwell, la termodinámica surgió *precisamente* para el estudio de la máquina de vapor, el símbolo de la Revolución Industrial. La máquina térmica permite que la energía fluya a su través para ‘convertir’ una *diferencia* de temperaturas en trabajo mecánico útil. La máquina se encuentra *entre* dos depósitos térmicos, uno caliente que le cede calor y otro frío, que se lo quita. Cada uno de estos depósitos es técnicamente un *sistema cerrado* que, como en el caso de un sistema *aislado*, no intercambia materia pero que, por el contrario, sí intercambia energía. La definición clásica de entropía sirve para este tipo de sistemas *cerrados*:

<sup>14</sup>Continuando con la discusión acerca del concepto de ‘información’, lo anterior sugiere otra descripción alternativa que expongo a beneficio de su crítica: aunque la información (incertidumbre) del universo alcanza su máximo, toda *diferencia* se desvanece, de manera que para el observador *dentro* de ese universo —en el supuesto de que continúe con vida— desaparece toda la información (significado).

<sup>15</sup>Contra esta interpretación pesimista, véase por ejemplo Gleick (1987:308), Sácz (1993:98).

<sup>16</sup>Una argumentación alternativa en el mismo sentido surge al introducir el concepto de ‘orden’ y al observar que el segundo principio excluye la posibilidad de ciertos procesos, aquellos en los que el ‘orden’ global aumenta. En apariencia esto parece contradecir todas las estructuras ‘ordenadas’ que vemos a nuestro alrededor. Pero, en cualquier caso, el mundo que atisbamos no es un sistema aislado, por el contrario está atravesado de intercambios de materiales y energía. Además este concepto de ‘orden’ resulta de la extrapolación sin fundamento de una imagen típica en termodinámica de gases: las moléculas de un gas agrupadas en la esquina de una caja aislada acaban por dispersarse uniformemente en su interior, alcanzando el sistema su máxima entropía. Tal parece como si la ‘flecha del tiempo’ apuntara a la situación tenida por más ‘caótica’, con las moléculas del gas viajando al azar y sin correlación por el interior de la caja. Para destruir de una vez por todas esta idea simplista del ‘desorden’ y su correlación con la entropía, considérese un ejemplo contrapuesto: un conjunto de partículas ‘gravitantes’ (estrellas, planetas, etc) aumenta su entropía realizando un movimiento exactamente contrario a las moléculas del gas: ‘ordenándose’ y agrupándose en ‘una esquina’ del universo en forma de agujero negro. Sin embargo, la correlación entre entropía e incertidumbre se mantiene: a fin de cuentas ninguna información logra escapar del interior de un agujero negro, nuestra incertidumbre vuelve a ser máxima, véase Penrose (1989).

el aumento de entropía de un sistema cerrado a temperatura constante  $T$  es igual a la razón entre el calor ganado  $Q$  y la temperatura:

$$\Delta_f S = \frac{Q}{T}$$

La definición parece sencilla, pero es ideal en muchos aspectos y, en cualquier caso, muy puntillosa, muy sofisticada.  $Q$  es positivo si el sistema ‘gana’ calor (aumenta su energía). La temperatura debe permanecer constante lo que resulta imposible en la práctica: un sistema *cerrado* que gana calor aumentará su temperatura . . . salvo que sea tan grande que ese aumento sea ‘infinitesimalmente’ pequeño y podamos despreciarlo. En consecuencia, la variación de entropía,  $\Delta_f S$ , puede ser positiva (ganando calor) o negativa (al perderlo). Esto no contradice la segunda ley puesto que el sistema es cerrado pero *no está aislado* (hay flujo térmico).

Merece la pena examinar el balance entrópico y energético de la máquina térmica clásica e *ideal*. El depósito caliente estará a temperatura  $T$  y cede una cierta cantidad de calor  $Q$ . El depósito frío estará a temperatura  $T'$ ,  $T > T'$ , y recoge una cantidad de calor  $Q'$ . La máquina térmica ideal (sin disipación ni pérdida) convierte parte del calor en trabajo mecánico,  $W$ . Todas las magnitudes representan valores absolutos (positivos). La primera ley aplicada a los flujos en la máquina simplemente establece:

$$+Q - Q' - W = 0$$

estando justificados los signos por los flujos vistos desde la máquina (nótese que la máquina también *cede* el trabajo mecánico, aunque podría cederlo a sí misma, y emplearlo en trabajos de mantenimiento).

Para aplicar la segunda ley, debemos situar los dos depósitos y la propia máquina en un *recipiente* aislado del resto del universo. Dentro de este sistema completo, el depósito caliente disminuye su entropía al perder calor en una cantidad  $-Q/T$ , mientras que el frío aumenta la suya en una cantidad  $+Q'/T'$ . La máquina *ideal* funciona reversiblemente y a lo largo de sus ciclos no produce entropía (por eso es *ideal*). Para que la máquina funcione ‘espontáneamente’ (una vez que ha sido construida y encendida) debe cumplirse la segunda ley para el sistema completo:

$$-\frac{Q}{T} + \frac{Q'}{T'} \geq 0$$

Si no se produce trabajo ( $W = 0$ ), la máquina se ‘reduce’ al flujo térmico entre ambos depósitos ( $Q' = Q$ ), y debido a la diferencia de temperaturas la entropía perdida por el depósito caliente es mucho menor que la ganada en el frío: la entropía total aumenta y el sistema conjunto se encamina hacia su equilibrio térmico (hacia la desaparición de la *diferencia*  $T - T'$ ).

Si se produce algo de trabajo ( $W \neq 0$ ), la entropía generada en el depósito frío disminuye ( $Q' = Q - W$ ), pero la entropía total puede seguir aumentando debido a la menor temperatura de este depósito. Sin embargo, cuanto mayor sea el trabajo producido menor será el aumento total de entropía, de manera que el máximo trabajo que puede obtenerse (o la máxima cantidad de calor que puede convertirse en trabajo) topa con el límite correspondiente a una entropía constante, invariable, que es lo más que permite la segunda ley.

Utilizando la última de las ecuaciones con el signo igual y sustituyendo la anterior en ella, se obtiene el máximo rendimiento que puede obtenerse de la máquina térmica (*con entropía constante*), razón entre el máximo trabajo que puede obtenerse y el calor perdido en la fuente caliente (en la cumbre del gradiente de temperaturas, allí donde puede tener utilidad):

$$\frac{W_{\max}}{Q} = \left(1 - \frac{T'}{T}\right)$$

Para esta máquina ideal el máximo rendimiento viene limitado exclusivamente por el gradiente de temperaturas entre las que trabaja (el rendimiento real será menor en una máquina *no* ideal). Para los motores usuales o las centrales nucleares ese rendimiento *ideal* es del orden del 40% (cf. ATKINS, 1984:41). Una máquina térmica acoplada entre el Sol (6.000 K) y el fondo oscuro del universo (4 K) podría alcanzar un rendimiento prácticamente *ideal*, del 99,93%.

## La Tierra y el Sol

La Tierra no es un sistema aislado pues recibe energía del Sol y transfiere energía al espacio exterior (manteniendo aproximadamente constante su temperatura). Informalmente, y sin perder nada esencial, podemos considerar a la Tierra como una máquina térmica atravesada por un flujo de energía constante que nos llega de nuestra estrella. Sin ese flujo, a la Tierra le aguardaría su 'muerte' térmica: la disipación de todo gradiente de temperaturas con el espacio exterior, según la versión pesimista de la segunda ley. Técnicamente ese final es la *posición de equilibrio* de la Tierra y juega el mismo papel que la posición de la esfera varada en el fondo del valle. Pero el constante flujo solar impide a la Tierra reposar, alcanzar el equilibrio: técnicamente, la Tierra es una 'máquina' fuera del equilibrio.

El balance entrópico de la Tierra puede establecerse de un modo análogo al de una máquina térmica: el Sol es una central de fusión nuclear de considerable tamaño, que transforma energía potencial nuclear de muy alta calidad en radiación de calidad algo menor pero de alta frecuencia, situada a una *muy apropiada* distancia del planeta. La Tierra, por su parte, tiene una estructura mucho más compleja, pero para el balance basta de momento con considerar que irradia energía en forma de radiación de baja frecuencia al

espacio exterior. De este modo, la Tierra recibe 'pocos' fotones de alta energía y entrega 'muchos' de baja energía<sup>17</sup>. En consecuencia, la radiación entrante es de baja entropía mientras que la saliente es de alta entropía<sup>18</sup>: la entropía total aumenta si el flujo energético de entrada es igual al de salida. Y como mucho, permanecería constante si el rendimiento de la Tierra alcanzara el límite ideal permitido por la segunda ley: en ese caso entran tantos fotones como salen y debido a la diferencia de frecuencias la Tierra acumularía energía. En cualquier caso, se ha sugerido muy a menudo que *existe* la *posibilidad* de que parte de ese flujo energético sea empleado en realizar trabajo mecánico en sentido amplio (construcción de formas, estructuras, etc., cf. DUVE, 1984:II,408-410).

Pero para que esta posibilidad se realice es necesario que exista una *máquina acoplada* entre el punto caliente (el Sol) y el fondo frío (el espacio exterior). En esencia, es el mismo fenómeno que una corriente de agua moviendo una noria: es necesario que la noria haya sido construida y puesta precisamente ahí<sup>19</sup>. Esta imagen deja sin explicar un problema: ¿quién o cómo se puso la máquina ahí? (cf. DUVE, 1984:II,410). Precisamente la teoría del caos, de la autoorganización, sugiere algunas respuestas interesantes a esta cuestión (véase más adelante, cf. también KAUFFMAN, 1992).

<sup>17</sup>Esa diferencia en la cantidad de fotones se debe a una evidencia experimental bien conocida: la energía que transporta un fotón es proporcional a su frecuencia: para transmitir el mismo flujo energético se necesitan, en consecuencia, menos fotones conforme su frecuencia sea mayor, cf. Penrose, 1989:400.

<sup>18</sup>Hay menos incertidumbre respecto de la radiación entrante por el simple hecho de que, a igual de energía, son menos fotones los que entran.

<sup>19</sup>La imagen del planeta como de una noria movida por el Sol es bien conocida (cf. Parra, 1993), pero sin un balance energético detallado —que me siento incapaz de precisar— resulta ambigua. Si se tratara de una máquina térmica ideal trabajando a su máximo rendimiento, no habría producción neta de entropía *pero* deberíamos asistir a un aumento sostenido de la energía libre, en forma de energía potencial. En tal caso, ¿dónde está el resultado del trabajo 'mecánico' efectuado? ¿cuáles son los gradientes en continuo aumento? La respuesta a estas preguntas es más intrincada de lo que parece a primera vista. Por el contrario, la aproximada constancia de la temperatura de la Tierra sugiere la hipótesis de que el flujo energético ganado sea cercano al perdido, de manera que la entropía del sistema conjunto aumenta incesantemente *pero* acompañada *precisamente* del despliegue de la vida: "¡Contrariamente a la impresión común, la Tierra (junto a sus habitantes) *no* gana energía del Sol!" (Penrose, 1989:400). La evidencia de la evolución (biológica, geológica, etc) apoya en cierto sentido esta última hipótesis (veremos más adelante más detalles). Esta otra visión —expuesta una vez más a beneficio de su crítica— da un papel constructivo a la entropía, papel del que carece en la visión más corriente de la entropía como 'desorden' (cf. Sącz, 1993:98). Quizá lo mejor de momento sea considerar a la Tierra como una máquina térmica trabajando *entre* ambas situaciones extremas. No se trata de dirimir salomónicamente la cuestión: después de todo esta última hipótesis parece compatible con dos características esenciales del despliegue de la vida: los *ciclos estacionarios* y *cerrados* de los materiales en muchos ecosistemas —pero no en todos— *junto* a la evolución y adaptación de los mismos.

## Comportamientos estacionarios

La entropía de un sistema aislado sirve como 'poste indicador' de la situación de equilibrio final, del mismo modo que la energía potencial cumplía ese papel en la mecánica clásica. El equilibrio se alcanza ahora cuando la entropía es máxima. Sin embargo, ese papel de indicador de la tendencia final del sistema se pierde en los sistemas cerrados. Aquí la única certeza es que la entropía debe aumentar o permanecer constante, lo que deja abierto el camino a muchas posibilidades de manera que la posibilidad de *predecir* o *anticipar* el comportamiento del sistema en estudio parece desvanecerse.

Al considerar la máquina térmica supuse que su comportamiento sería *ideal*, de modo que la variación de entropía sería debida *exclusivamente* a los flujos de energía en los depósitos. Pero en cualquier máquina real se producen 'pérdidas' debidas a fricciones, pérdidas de calor inherentes al trabajo mecánico realizado, de manera que resulta en la práctica imposible convertir completamente la diferencia de calor  $Q - Q'$  en trabajo mecánico porque una parte de esa diferencia produce calor en la *propia* máquina durante la conversión. Estas 'pérdidas' son responsables de un aumento adicional de la entropía,  $\Delta_p S$ , *cualitativamente* distinto a las variaciones debidas a los intercambios de energía.

En efecto, estos últimos pueden ser reversibles (aún si es necesario realizar un trabajo para ello), mientras que las 'pérdidas' producen efectos irreversibles (como los cambios en un sistema aislado): la noria se desgasta con el paso del tiempo<sup>20</sup>. De este modo, en un sistema cerrado o en una máquina real, la variación total de entropía ( $\Delta S$ ) consta de dos sumandos: la debida a *flujos* reversibles ( $\Delta_f S$ ), y la *producción interna e irreversible* en el propio sistema ( $\Delta_p S$ ):

$$\Delta S = \Delta_f S + \Delta_p S$$

Los dos sumandos son cualitativamente diferentes: el primero puede ser positivo o negativo (tal y como vimos en los depósitos de la máquina térmica); mientras el segundo es *siempre* positivo (como si se tratara de un sistema aislado)<sup>21</sup>. El cambio espontáneo ha-

<sup>20</sup>Una noria envejecida, gastada por el continuo paso del agua, puede enternecernos, ser bella —aunque no siempre o cualquier noria—, ¿nos encontramos también aquí con el papel constructivo de la entropía?

<sup>21</sup>Estas propiedades no siempre son bien entendidas por los divulgadores que, cegados por la necesidad de justificar el 'orden' mediante la disminución de la entropía, llegan a invertir los papeles de los dos términos. Por ejemplo, Rueda (1996:61) describe así el asunto: "[Prigogine] razonó que el término general de la entropía puede dividirse en dos partes. La primera refleja los intercambios del sistema y el mundo exterior y la segunda describe qué cantidad de entropía se *produce* dentro del mismo sistema. La segunda ley de la termodinámica exige que la suma de estas dos partes sea positivo, excepto en el estado de equilibrio, el primer término será tan positivo que, aún siendo *negativo el segundo término*, la suma seguirá siendo positiva" (la cursiva es mía). Pero en realidad, Prigogine et Stengers (1984:119) afirman: "The peculiar feature of the second law is the fact that the production term  $d_i S$  [nuestro  $\Delta_p S$ ] is *always positive*. The production of entropy expresses the oc-

currence of irreversible changes inside the system." De hecho, para un sistema aislado (sin flujos, es decir, sin  $\Delta_f S$ ) la segunda ley prescribe el aumento de  $\Delta_p S$ . La versión correcta, de todas formas, está disponible en multitud de referencias, véase por ejemplo Sácz (1993:97).

cia el equilibrio ( $\Delta_p S > 0$ ) 'atrae' el sistema hacia una situación estable, de la que no saldrá de no mediar una causa exterior. Por el contrario, los cambios reversibles ( $\Delta_f S$ ) están determinados y controlados por las condiciones en los límites del sistema, por su *contexto*.

Los cambios irreversibles son predecibles hasta cierto punto: basta calcular el máximo de la entropía tal y como se hizo con el mínimo de la energía potencial, aunque tal cálculo pueda ser muy complicado. En esa posición la entropía es máxima y *por tanto*  $\Delta_p S$  es nulo para un sistema aislado que alcanza su posición de equilibrio. Esta consecuencia es importante y merece la pena recalcarla: en la situación de equilibrio, la *producción de entropía* cesa.

¿Son los cambios reversibles predecibles del mismo modo? Es posible extender la idea de una función potencial a los sistemas cerrados. Así, en un sistema cerrado cuyo contexto le 'guarda' a temperatura constante mediante intercambios térmicos adecuados, el 'equilibrio' viene definido por el valor mínimo de la *energía libre*  $F$ , definida como  $F = E - TS$ , donde  $E$  es la energía del sistema. Esta fórmula simboliza que el equilibrio es el resultado de un compromiso entre la energía y la entropía, y la temperatura determina quien prevalece. A bajas temperaturas, el contexto fuerza al sistema a una configuración de baja energía tal como es un cristal sólido: la energía potencial entre partículas es dominante, mientras que la energía térmica es despreciable: cada partícula está atrapada por la interacción con sus vecinas. Sin embargo, a altas temperaturas la importancia de la energía térmica (y del movimiento incoherente de las partículas) aumenta: la regularidad del cristal se rompe: la materia se evapora y volvemos al modelo cinético de los gases<sup>22</sup>.

Si en los límites de un sistema no sólo hay flujos de energía sino también de materia, el sistema es *abierto*. Los cambios de entropía en estos sistemas se pueden seguir contabilizando mediante los dos sumandos anteriores: producción interna y flujos, ahora

<sup>22</sup>Si  $T = 0$  la condición de mínimo para la energía libre  $F$  es idéntica a la de mínimo para la energía  $E$ ; por el contrario si la temperatura es muy alta,  $F \approx -TS$ , y el mínimo de  $F$  coincide esencialmente con el máximo de la entropía  $S$ , cf. Prigogine et Stengers (1984:126). De estos dos extremos surgen los dos tipos básicos de motor: la máquina de vapor ya analizada y el *motor entrópico*. La primera requiere un gradiente de temperaturas (lo que la invalida como modelo para la gran mayoría de los seres vivos); la segunda convierte calor del contexto en trabajo mecánico a temperatura constante, mediante *producción interna* de entropía, superior a la *reducción de entropía ocasionada al entorno*. Ambas máquinas son reversibles: pueden utilizarse para invertir el flujo del calor o de la entropía, *pero gastando* trabajo o energía interna en mayor cantidad que el calor transmitido. Los seres vivos más complejos —capaces de soportar un gradiente de temperaturas con el contexto— utilizan una amplia variedad de motores de ambos tipos, en modo directo o inverso; véase una descripción detallada en Duve (1984:II:408-414).

de energía y de materia. El contexto de tales sistemas puede imponer condiciones precisas a su funcionamiento. Puede ocurrir por ejemplo que dos puntos del sistema permanezcan a diferentes temperaturas, o que un flujo de materia constante suministre reactivos y elimine los productos de una reacción química. Si el contexto impone tales condiciones constantes, el sistema está forzado a un estado estacionario que todavía puede caracterizarse mediante una función potencial. Este estado hacia el cual el sistema evoluciona es desde luego un estado de *no-equilibrio*, en el cual tendrán lugar permanentemente procesos disipativos. Esto es necesariamente así debido a que el contexto mantiene una diferencia de temperaturas o un flujo de materia que habrían desaparecido en un estado de *equilibrio* (de máxima entropía). Pero como se trata de un estado estacionario, todas las magnitudes que describen el sistema *no dependen del tiempo*. En particular, la entropía del sistema también será independiente del tiempo y, *por tanto*, su variación será nula,  $\Delta S = 0$ . Esto implica  $\Delta_f S = -\Delta_p S < 0$ . El flujo *neto* de materia o energía que llega desde el *contexto* determina un flujo negativo de entropía que es compensado por la producción de entropía debida a los procesos irreversibles *en el interior del propio sistema*. Un flujo negativo  $\Delta_f S$  significa que el sistema transfiere entropía a su entorno. En consecuencia, en su estado estacionario, la actividad del sistema continuamente incrementa la entropía de su entorno. Esto es cierto en general, pero el particular estado estacionario al que tiende el sistema es el de *mínima* producción de entropía (consecuencia de aplicar  $\Delta S = 0$  en vez de  $\Delta S > 0$ ), y por tanto la transferencia de entropía al entorno es tan pequeña como permiten las condiciones impuestas al sistema: cuando estas condiciones impiden al sistema evolucionar hacia el equilibrio como sistema aislado ( $\Delta_p S = 0$ ), el sistema hace lo 'siguiente mejor': producir la menor entropía posible, es decir, acercarse al equilibrio tanto como puede. En tales casos el analista debe volver su mirada hacia el *contexto* del sistema, pues es éste quien determina cuál será la *mínima producción de entropía permitida*. La idea del 'metabolismo basal' en los seres vivos es muy cercana a esta producción mínima de entropía. Pero expresa un mínimo que *precisamente* sólo permite trabajos de mantenimiento y reparación (cf. DUVE, 1984:II,423): cualquier organismo vivo que realiza una acción por un propósito *abandona* este comportamiento estacionario.

## Lejos del equilibrio

Merece la pena hacer recuento de las "formulaciones potenciales" que hemos ido encontrando. Primero fue el principio de mínima energía potencial que define la posición de *equilibrio estático* de un cuerpo, pero que sólo permite una visión mecánica del mundo. Después el principio de máxima entropía, que define

idéntica posición de equilibrio pero ampliando el horizonte de nuestra percepción hacia el resto de las formas en que se manifiesta la energía, aunque impone la consideración de sistemas tan grandes y completos como para que puedan considerarse *aislados*. Para sistemas *cerrados*, la posición de equilibrio se deduce de la mínima energía libre. Finalmente, el principio de mínima producción interna de entropía define el comportamiento de los sistemas *abiertos* sometidos a un flujo tal que les mantiene fuera del equilibrio, pero *en una posición estacionaria* alrededor de él, "cerca del equilibrio".

La termodinámica del siglo XX, bien representada por Ilya PRIGOGINE e Isabelle STENGERS (1984:140), ha afrontado como programa de investigación la búsqueda de nuevos potenciales para los sistemas abiertos "lejos del equilibrio". Pero, sorprendentemente, lo que se encontró fue el *caos*, que en este contexto significa no el azar, sino la *ausencia* de una forma potencial calculable que permita caracterizar el *objetivo* de la evolución de tales sistemas "lejos del equilibrio". Tales sistemas pueden incluso evolucionar hacia algunos estados con regularidad manifiesta, pero en general tales estados no pueden caracterizarse en términos de un 'potencial' adecuadamente elegido (cf. STENGERS, 1993:43-52; LÓPEZ, 1993:100-101).

Este aspecto es tan importante que bien merece una digresión. En los sistemas que tienden al equilibrio o a una posición estacionaria en su rededor, no importan las condiciones de partida: podemos calcular la posición final debido a que contamos con un potencial cuyo valor óptimo *señala* a dicha posición. Por tanto, con independencia de aquellas condiciones iniciales podemos *predecir* la posición final —estática o estacionaria. Además si el sistema la alcanza, ligeras fluctuaciones podrán apartarlo de ella, pero la segunda ley de la termodinámica impone que vuelva a ella. Tales sistemas son en cierto sentido 'inmunes' a las fluctuaciones y al cambio. En cierto sentido, las funciones potenciales asociadas describen un 'mundo estable' en el cual el sistema evoluciona *desde cualquier* situación inicial hacia una situación *predecible* y estática que está establecida de una vez y para siempre: el sistema no 'guarda' memoria de su pasado y un observador puede 'predecir' su futuro.

Pero, si la conjetura detrás de la teoría del caos y de la termodinámica "lejos del equilibrio" es correcta, si "lejos del equilibrio" no hay ningún potencial, toda posibilidad de predecir el objetivo o fin de la evolución se desvanece (de hecho, lo más prudente es concluir que tal objetivo o fin es inexistente). Lo que se encontró fue, de hecho, la carencia de un "objetivo" hacia el que evolucionar, la "autoorganización" immanente como única clave de comprensión. Aquí las claves interpretativas se invierten:

1. Las condiciones iniciales son *determinantes* de la evolución posterior del sistema: distintas condiciones de partidas pueden conducir al sistema a *muy distintos* comportamientos, con indepen-

dencia de que en sí mismos sean regulares o azarosos.

2. Pequeñas perturbaciones infligidas al sistema pueden amplificarse, apartándose de su *actual* comportamiento: el sistema puede ‘aprender’ o ‘adaptarse’.
3. Un observador no puede ‘predecir’ el futuro del sistema pero puede averiguar con cierto margen su posición de partida: el sistema ‘guarda’ información<sup>23</sup> de su pasado.

Los sistemas “lejos del equilibrio” *producen* entropía internamente y se alimentan de flujos que *aumentan* la entropía del entorno: o bien aumentan la incertidumbre del observador: éste es —hasta cierto punto, cf. STENGERS (1993:48)— el aumento de diversidad biológica que se observa en algunos ecosistemas. Sin embargo, en esta clase de sistemas uno se encuentra tanto con estructuras ‘ordenadas’ como ‘desordenadas’, de manera que no parece que la entropía pueda servir como *rasero* para distinguir unas de otras, como a menudo se pretende<sup>24</sup>.

Vistas las cosas desde el cómodo sillón del historiador, es fácil mostrar que este paradigma había ido surgiendo en muy diversas disciplinas y merece la pena un breve repaso por algunas de ellas.

## Darwin (y Lamarck ...)

En primer lugar, figura la teoría de la evolución de las especies de Darwin. Conviene resaltar como el principio teórico darwiniano que más irritó a sus críticos no fue que el hombre evolucionara del mono, o la negación de una interpretación excesivamente simplista o literal del Génesis; se trató más bien de la *negación* de un propósito, de un fin en esa evolución (STEADMAN, 1979:161–164). De hecho, ese es el tema central de la refundación de la teoría de la evolución, cuya hipótesis de trabajo es la de la deriva genética: los genes no evolucionan “hacia” ninguna meta predeterminada —ni optiman potencial alguno—, por el contrario evolucionan “desde” su situación actual (STENGERS, 1983:42). La clave de comprensión sería la *autoorganización*: la evolución se produce por recombinación genética y, de hecho, se produciría incluso en ausencia de mutaciones (que han resultado ser operadores marginales, abandonando el papel central que tuvieron, cf. HOLLAND, 1992). Lejos de tratarse de la optimación de una única magnitud (la fertilidad), la evolución genética parece ofrecer

<sup>23</sup>En el sentido de Bateson, es decir, información como significado, no como incertidumbre.

<sup>24</sup>Está es, a mi juicio, la pretensión de Rucda (1996). Por el contrario, la caracterización de tales sistemas, *si es que pudiera alcanzarse completamente*, debería buscarse en nuevas claves de comprensión, tales son los intentos de la teoría del caos. Sin embargo, el viejo paradigma manifiesta un vigor insólito, y así también Margalef (1995:71–72) especula con la posibilidad de encontrar una nueva función de estado, un “principio variacional”, a la vez que se inclina por una “visión moderadamente indeterminista” (1995:73).

un catálogo ‘diverso’ a un problema multivariable, a un problema de optimación vectorial. La deriva genética sería así más un juego que una necesidad. Y además, la clave genética por sí sola parece incapaz de explicar los detalles que llevan del genotipo al fenotipo (cf. KAUFFMAN, 1992). Esta caracterización se extiende de un modo natural a la ecología, en la que observamos como los ecosistemas, se encaminan por derivas semejantes (cf. MARGALEF, 1995:73). O por decirlo abruptamente, el “equilibrio ecológico” del que ahora tanto se habla es en realidad un deseo imposible, una flagrante contradicción (cf. GLEICK, 1987:322). Aunque nociones como “equilibrio inestable” sean útiles desde un punto de vista técnico, no dejan de esconder un “intrínseco” desequilibrio, cf. DUVE (1984:II,423)).

En tales sistemas biológicos la única cuantificación que se observa en muchos casos es el aumento de la diversidad. De las muchas definiciones disponibles (véase MARGALEF, 1980) una muy habitual es la de *incertidumbre*, tal y como se propone en la teoría de la información (cf. VÁZQUEZ, 1994:48–50):

$$H = - \sum p_i \log p_i$$

en la que  $p_i$  es la frecuencia de cada especie (o de cada gen, proteína, etc) en el sistema en estudio.

Qué la evolución biológica requiere organizaciones “lejos del equilibrio” es bastante obvio a fin de cuentas: para la adaptación, la evolución o el aprendizaje se requieren dos tensiones contrapuestas: por una parte, capacidad de aprender y de cambiar; por otra, capacidad de conservar y de permanecer. Mientras que lo último puede ser ofrecido por los sistemas conducidos por potenciales, para lo primero son necesarias las propiedades emergentes en los sistemas lejos del equilibrio<sup>25</sup>. De hecho, una de las hipótesis más sugerentes en los últimos tiempos surge de especular acerca de si la vida no tendría su *origen* y su *permanencia* en la frontera que separa los sistemas con comportamiento totalmente aleatorio (impredecible) de aquellos otros estables (predecibles) —véase KAUFFMAN (1992), PENROSE (1989).

## Caos

La teoría del caos resulta difícil de sintetizar sin una matemática excesivamente engorrosa, aunque existen algunas síntesis más o menos afortunadas. El “efecto mariposa”, por ejemplo, es bien conocido debido a la película *Jurassic Park* en la que creo se cita su frase seminal: “el aleteo de una mariposa hoy en Pekín, puede causar una tormenta mañana en New York” (cf. GLEICK, 1987:16). Una vieja canción europea

<sup>25</sup>Para este análisis, la relectura de los trabajos de Lamarck puede tener interés, cf. Bateson (1972:457–463), Schrödinger (1944), Steadman (1979): si no existe una ‘meta’ y la evolución se produce *desde* la situación actual, parece indudable la importancia de los *propósitos* que expresan las acciones de los seres vivos. Otra cosa es *cómo* los resultados debidos a estos propósitos quedan ‘grabados’ en la memoria evolutiva.

expresa la misma idea con mayor credibilidad: "Por un clavo se perdió una herradura/por una herradura se perdió un caballo/por un caballo se perdió un jinete/por un jinete se perdió una batalla..." La idea es que en sistemas "lejos del equilibrio" pequeñas fluctuaciones en las condiciones iniciales pueden permanecer y subsistir, originándose diferencias cualitativas que tornen irreconocibles dos sistemas que evolucionan "desde" el mismo origen. Ya se conocen sistemas de laboratorio que muestran un comportamiento semejante, y resulta plausible la hipótesis de que los fenómenos económicos, sociales y culturales sólo puedan ser entendidos en claves semejantes. Pero este 'caos' no es el azar ni el desorden. El caos *puede* crear 'orden', de hecho, en un sistema como nuestro planeta, el despliegue de estructuras ordenadas sería posible precisamente por que estamos "lejos del equilibrio" que, recuérdese, consistiría para el planeta como un todo en la *muerte térmica*.

### Dinámica de poblaciones

Merece la pena mostrar al menos un ejemplo sencillo de la naturaleza a la vez simple y compleja de los denominados sistemas caóticos. Un ejemplo clásico surge de la denominada 'ecuación logística' con la que se intenta modelar de forma sencilla pero esencial la evolución del tamaño de una población de seres vivos. La ecuación puede escribirse, por ejemplo, como:

$$x' = rx(1 - x)$$

donde  $x$  representa la población actual al final de un período de tiempo prefijado (un año, por ejemplo);  $x'$  es la población en el siguiente período; y  $r$  es un parámetro que intenta sintetizar las particularidades del sistema en estudio.  $x$  y  $x'$  varían entre 0 (extinción) y 1 (máxima población sostenible por el territorio), mientras que  $r$  puede tomar valores entre 0 y 4. El término  $rx$  puede interpretarse simplemente como la tasa de reproducción de la población: cuantos más individuos hay, más individuos se producen.  $(1 - x)$  representa el agotamiento de los recursos de los que la población se alimenta: cuando se alcanza la máxima población todos los recursos se agotan y la siguiente generación muere de hambre<sup>26</sup>.

La ecuación es tan simple que no cabe esperar ninguna complicación. La pregunta habitual será: ¿cuál es el tamaño en el que se *estabilizará* la población al cabo del tiempo? La respuesta se destila resolviendo la ecuación  $x' = x$ , es decir, hallando el valor de  $x$  que se repite año tras año. Hay dos soluciones, la

<sup>26</sup>No es difícil reinterpretar la ecuación en términos de la teoría malthusiana, aunque esta teoría conduce a una ecuación aún *más complicada*, presumiblemente más caótica; de todas formas, no tiene aquí interés cual sea la interpretación que se dé a la ecuación. Nótese que en cualquier caso se trata de una función *recursiva* y no de una función ordinaria. Otras figuras famosas por impredecibles (y por tanto caóticas), como el conjunto de Mandelbrot, surgen también de expresiones matemáticas sencillas que se aplican recursivamente una y otra vez. Las ecuaciones no definen 'estados' sino 'procesos'.

**La ecuación logística**  
Resultados para  $x_0 = 0,2$ .

$r$	2,7	3	3,25	3,5	3,6	3,83
$x_{eq}$	0,63	0,67	0,69	0,71	0,72	0,74
$x_{ev}$	0,63	0,67	0,50	0,38	caos	0,16
			0,81	0,83		0,50
				0,50		0,96
				0,87		

extinción ( $x = 0$ ) o un cierto tamaño dado por una expresión que no tiene nada de sospechosa:

$$x_{eq} = \frac{r - 1}{r}$$

Con esta expresión es posible (en apariencia) *predecir* la situación en que la población se estabilizará o se extinguirá, y ello *sin necesidad* de acompañar a la población en el transcurso de su evolución. Esto último puede hacerse de todos modos: se comienza con una población inicial elegida al azar,  $x_0$ , y mediante la ecuación se calcula el valor para el año siguiente,  $x_1 = rx_0(1 - x_0)$ . La operación se repite sucesivamente y se obtiene una serie de poblaciones  $x_0, x_1, x_2, x_3, \dots$  que acabarán por conducir a un valor estable, digamos  $x_{ev}$ . En principio debiera ocurrir  $x_{eq} = x_{ev}$ , lo que serviría para comprobar que el cálculo anterior para  $x_{eq}$  fue correcto.

En la tabla se muestran lo que sucede para algunos valores de  $r$ . Los resultados deben interpretarse como sigue:

1. Para  $r$  menor que 3 el comportamiento es estable y la evolución conduce al valor de equilibrio predicho por la teoría.
2. Para los valores de  $r$  3,25 3,5 y 3,83, el comportamiento es cíclico con períodos de 2, 4 y 3 años respectivamente; los valores indicados para  $x_{ev}$  son los tamaños de población que se repiten cíclicamente: el valor de equilibrio,  $x_{eq}$ , *nunca* es alcanzado en la evolución, pero al menos ésta puede predecirse una vez *recorrido un ciclo completo de la historia de la población*.
3. Para  $r$  igual a 3,6 ni siquiera esto último es posible: la población evoluciona *aperiódicamente*, sin que ningún año se repita el tamaño de años anteriores: su evolución es *impredecible* (salvo que se calcule la evolución completa desde el inicio hasta el año de interés, pues a fin de cuentas esta ecuación es determinista).

Los resultados para todo el intervalo de  $r$  se resumen en la figura 3. En el eje de abscisas se representa (entre 0 y 4); mientras en el eje de ordenadas el o los valores de  $x_{ev}$ . Para  $r < 1$  la población siempre se extingue. Si para un valor de  $r$  la población se

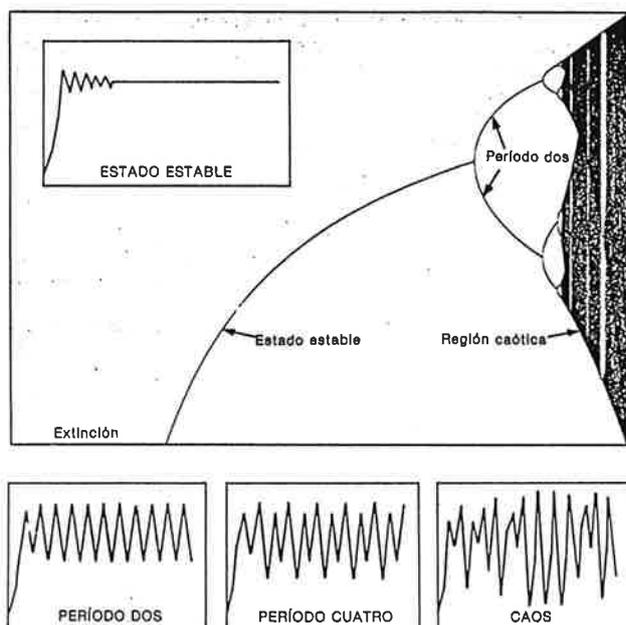


Figura 3: Ecuación logística. (GLEICK, 1987)

estabiliza, la vertical correspondiente corta una única curva; si el ciclo es bianual, dos; y así sucesivamente. Si la evolución es aperiódica, la vertical se colmata de puntos...

Resulta notable que para  $r = 3,83$  el comportamiento tenga período 3, mientras que para un valor ligeramente inferior al anterior, el comportamiento sea caótico: el más pequeño error en la determinación de  $r$  en las cercanías de ese valor puede conducir a un error garrafal en la propia caracterización del sistema en estudio.

Considerando el espacio en que se mueve  $r$ , entre 0 y 4, resulta notable ver como pequeños intervalos de valores, para los que la evolución acaba en valores estables o cíclicos de la población, se intercalan con otros intervalos en los que la evolución es aperiódica. Este engarce de caos y estabilidad se sucede en intervalos cada vez más pequeños conforme  $r$  se acerca al valor  $4^{27}$ .

<sup>27</sup>Por supuesto el análisis matemático puede dar cuenta todavía de —incluso predecir— algunas cualidades adicionales de esta 'sencilla' ecuación logística. En realidad, la ecuación anteriormente resuelta,  $x' = x$ , contiene un prejuicio: que la población acabará estabilizándose. Pero ya se ve que no siempre ocurre tal cosa. Para averiguar la existencia de ciclos de dos valores hay que resolver simplemente una ecuación más complicada:  $x_{i+2} = x_i$  donde  $x_i$  representa la población en un año cualquiera e  $i + 2$  denota dos años después. El razonamiento se extiende a tres, cuatro, ... años, con ecuaciones cada vez más complejas. Las soluciones (si existen en el intervalo 0 a 1) de esta serie (infinita) de ecuaciones son (en jerga) los 'atractores' de la ecuación logística. Se ha demostrado que si la ecuación logística contiene ciclos de período primo (3 ó 7, por ejemplo) también tendrá evoluciones aperiódicas. Cuando esto ocurre, de algún modo, desde ciertas condiciones iniciales la evolución de la población logra escapar a todos los 'atractores' (en jerga existe un 'atractor extraño'). El diagrama de la figura 3 es una figura fractal: si se amplían algunas pequeñas regiones al tamaño de la figura completa, se pueden encontrar figuras cuasiidénticas a la original. Para más detalles, véase Fernández-Rañada (1986).

Aquí, de todos modos, hay que ser cuidadoso con la tentación de generalizar: lo que se predica es la complejidad del objeto matemático que se analiza: nada puede afirmarse de las poblaciones reales que tan groseramente así se modelan. En cualquier caso resulta claro el golpe propinado a la versión corriente del mecanicismo (sobre todo porque, aquí, ni siquiera estamos frente a un caos indeterminista). Y desde luego también queda demostrada la posibilidad de un comportamiento semejante en poblaciones reales (aunque una elemental prudencia sugiere esperar comportamientos más complejos aunque quizá menos caóticos). A fin de cuentas seguimos hablando de un modelo: y si la transmutación prestigiosa que el lenguaje formal de Laplace indujo en sus prejuicios no justificaba sus conclusiones, tampoco podemos ahora cobijarnos detrás de los nuevos descubrimientos por formales o asombrosos que puedan resultarnos (STENGERS, 1993:54), salvo quizá para desentendernos definitivamente de las conclusiones de aquél.

(Para la sociología de la ciencia, merece la pena subrayar que las propiedades complejas de la ecuación logística no fueron descubiertas por los biólogos — que la emplearon para modelar la evolución de las poblaciones reales con profusión— o al menos, si lo hicieron, se desentendieron del asunto como de una rareza. La conclusión a la que llegaron está implícita en las filas  $r$  y  $x_{eq}$  de la tabla: a mayor tasa de reproducción, mayor población estable.)

### Consecuencias epistemológicas

El significado más pertinente de la teoría del caos ha sido bien resumido por ESCOHOTADO (1993:36-37):

Los fundadores de esta perspectiva han demolido el último bastión del paradigma newtoniano, mostrando que lo descartado por principio —la vitalidad de la materia— es un simple prejuicio.

En vez de un universo compuesto de o regido por entes de naturaleza ideal — puntos, rectas, sólidos regulares, fuerzas inmatrimateriales y pura inercia en todo lo demás— nos han abierto el pormenor de un universo que crea sus perfiles desde sí, libre de infinitos transcendentales y repleto de infinitudes concretas, donde en vez de concebirse como monstruo devorador de todo orden, la turbulencia se descubre como factor estructurante. Los matemáticos, químicos, meteorólogos y biólogos que están llevando adelante este último giro copernicano tienen en común devolvernos a la dimensión física como tal, a lo que significa *physis* para Heráclito o Aristóteles. Han demolido una concepción del mundo que hizo de la exactitud su lema y que, por eso mismo, descartó como caos lo no lineal, lo aperiódico, irreversible, sintético, narrativo, sensible,

abrupto, activo, complejo, singular. Aunque esto constituya prácticamente la totalidad del mundo real, escapa a las exigencias del cálculo y fue puesto de lado como “caótico”. Pero allí —en objetos de inimaginable complejidad dentro de áreas finitas (como los fractales) o en la termodinámica del desequilibrio— reside la capacidad cosmogónica, la principal fuente creadora de fenómenos.

## La máquina de cálculo

La síntesis de ESCOHOTADO (1993) nos retrotrae a un tema que toqué con anterioridad: el *cálculo* de óptimos. Y aquí también el nuevo paradigma ha surgido con el rigor formal y lingüístico de la matemática. La teoría de algoritmos, en particular la teoría de creación de programas para computadores, ha puesto de relieve la existencia de problemas irresolubles tanto como la de problemas intratables o inabordables.

Recuérdese que la optimización diferencial prometía la resolución de problemas con dos condiciones: el objeto en estudio debía caracterizarse como un sistema matemático definido por sus posibles estados o configuraciones; además el objetivo perseguido, debía representarse mediante una función potencial escalar con valores bien definidos para cada configuración o estado del sistema.

Pues bien, la existencia de problemas irresolubles se sigue directamente de la aparición de sistemas “lejos del equilibrio”, cuyo comportamiento ninguna función potencial caracteriza; aunque la simple existencia de problemas vectoriales indecidibles constituía ya un obstáculo aún mayor. El asunto conduce a las mismas sugerencias ya exploradas respecto al caos y la termodinámica y no merece comentarios adicionales.

Más instructivo puede resultar el análisis de los problemas intratables. Además, aquí es posible dar un ejemplo sencillo que ilustra bien los límites que el nuevo paradigma pone al descubierto. Se trata del problema conocido como “viajante de comercio” y puede plantearse muy brevemente. Un viajante de comercio desea visitar un cierto número de ciudades y volver a la ciudad de partida, eligiendo para ello el itinerario de mínimo recorrido. Como es habitual las distancias entre las ciudades son conocidas y el cálculo de cada itinerario (definido como un cierto orden de las ciudades) consiste en una simple suma de distancias.

Nótese que se trata del problema más simple de una clase de problemas muy diversos, entre los que se incluyen muchos problemas de interés en ecometría, ingeniería y arquitectura. Baste citar la obtención de formas óptimas en estructuras, o la disposición de habitaciones en una superficie con relaciones dadas *a priori*, por ejemplo. A pesar de su simplicidad, el

problema del viajante de comercio incluye todas las características esenciales de la clase en cuestión.

El problema es resoluble: para ver esto nótese que para encontrar el itinerario más corto basta con calcular la longitud de todos los itinerarios posibles y ordenarlos en orden creciente. El primero de la lista es la solución buscada. Un programa de computador capaz de acometer la tarea cabría en una hoja de papel.

Y, sin embargo, el problema es en general inabordable, resulta intratable. Para llenar de significado esta cualidad lo mejor es considerar el tiempo de cálculo necesario para resolver problemas de este tipo con distinto número de ciudades. Podemos imaginar para ello que contamos con un computador muy rápido capaz de calcular la longitud de cada itinerario en una billonésima de segundo. Con estos datos podemos construir la siguiente tabla:

CIUDADES	ITINERARIOS	TIEMPO
3	1	$10^{-12}$ s
6	60	$6 \times 10^{-11}$ s
12	19.958.400	$2 \times 10^{-5}$ s
24	$1,29 \times 22$	4 siglos
48	$1,29 \times 10^{59}$	$4 \times 10^{36}$ milenios

Como se ve, a partir de cierto tamaño el tiempo de cálculo excedería incluso la edad estimada del universo. El argumento de que con un computador más rápido la intratabilidad desaparece es falso, basta con hacer los números: en el caso de 48 ciudades, un computador un millón de veces más rápido tardaría todavía más de  $4 \times 10^{30}$  milenios en resolver el problema: sólo hemos reducido seis de los treinta y seis órdenes de magnitud temporal que nos separan de su solución *exacta* ...

## Sistemas y procesos

Este género de problemas permanecen intratables salvo que se acepten soluciones buenas, no necesariamente óptimas. Incluso entonces un cambio de paradigma ha sido necesario para construir algoritmos eficientes que aproximen conjeturas sensatas acerca de soluciones satisfactorias. El cambio consiste en abandonar la noción de *sistema* y la caracterización diferencial de su configuración óptima, para sustituirla por la de *proceso* y su evolución hacia soluciones inmejorables en un contexto dado (cf. GLEICK, 1987:228; STENGERS, 1993:43-45). Tales algoritmos se construyen como analogías al comportamiento de sistemas naturales, tales como los gases de partículas de la termodinámica, o los cromosomas de la teoría genética. Para tal analogía se hace necesario el manejo siquiera simulado del azar y de la indeterminación intrínseca de tales sistemas, y se trata de algoritmos estocásticos. Pero funcionan, ofreciendo catálogos de soluciones útiles (pero no soluciones únicas) y, de hecho, mejores que aquellas

otras ofrecidas por aproximaciones más ‘racionales’, basadas aún en la noción de sistema.

Como resultado inesperado de tales algoritmos —con nombres extraños como “recocido simulado”, “deriva genética” o “democracia directa”, cf. VÁZQUEZ (1994:55–56)— se han generado teorías matemáticas para su comprensión, que precisamente por la analogía sugieren características esenciales de los procesos naturales que imitan, de manera que como apuntara HOLLAND (1992a), tales teorías permitirán quizás devolver a la Naturaleza la deuda contraída, al permitirnos comprender mejor y respetar en consecuencia los procesos adaptativos de nuestras compañeras en ella.

El escollo de los problemas vectoriales no desaparece con estos algoritmos. Uno de ellos en particular, el algoritmo genético, es especialmente apropiado para una aproximación de soluciones en problemas de optimización vectorial de dos o más dimensiones. Su funcionamiento pone de relieve con evidencia los límites de la técnica: en la evolución de la ‘población’ se descartan sucesivamente las soluciones *decididamente peores*, pero la conclusión del proceso no es una solución única, sino una colección de soluciones no-peores entre las cuales no es posible *decidir objetivamente*. (Los algoritmos genéticos, además, enfrentados con el problema de maximizar la fertilidad en problemas de optimización escalar, conducen a una *pérdida acusada de diversidad* —en contraste con muchos datos empíricos, cf. *supra*—, lo que sugiere poner en duda que la teoría de la evolución del ‘más fértil’ pueda explicar por sí sola el despliegue de la vida, tal y como lo *observamos*, véase GOLDBERG, 1989).

## De nuevo, la Tierra

¿Qué hay de nuestro planeta? ¿Se trata de un sistema estacionario, girando alrededor de un equilibrio —la muerte térmica— inalcanzable gracias al flujo solar? Después de todo, parece que la respuesta debe ser un “no” rotundo. Nada en el horizonte nos muestra una *permanencia* semejante. Por el contrario, los fenómenos de todo tipo que nos rodean, ya sean geológicos, biológicos o culturales, muestran una característica común hasta donde hoy sabemos, resumida bien en el paradigma evolutivo. Asistimos a finales del siglo XX, gracias a los nuevos instrumentos de observación fabricados durante la última centuria, a la deriva de los continentes, de las especies, de las civilizaciones humanas. Técnicamente, nos encontramos ante un sistema “lejos del equilibrio” y no cabe esperar nos encontremos ante una producción mínima de entropía (ni en la situación actual, ni en las que la precedieron, ni en las ‘nuevas’ que se proponen: cf. RUEDA, 1996; MARGALEF, 1995:71–72). La extraordinariamente simple definición de LOVELOCK (1992) para buscar la ‘vida’ más allá de nuestro planeta —definición de la que parte para formular la conocida hipótesis ‘gaia’— se reduce simplemente a esa lejanía

del equilibrio: búsquese un planeta cuya composición atmosférica sea incompatible con el equilibrio termodinámico de un sistema cerrado: la ‘vida’ se encontrará *al lado y detrás* de ese desequilibrio manifiesto.

Si todo lo anterior es correcto, desafortunadamente o no, ninguna función potencial nos servirá de guía, ningún ‘cálculo’ podrá discriminar entre los muy distintos objetivos que se vislumbran en el horizonte histórico de este planeta... Nada nos evitará la necesidad *ética* de tomar nuestras propias decisiones *políticas*...

## Consecuencias del nuevo paradigma

Este apretado resumen de la evolución científica desde Galileo hasta la teoría del caos ha de resultar necesariamente incompleto. Para terminar intentaré exponer como las sugerencias del nuevo paradigma podrían tener un impacto más práctico en nuestras actividades cotidianas, aunque ésta exposición será mucho más incompleta todavía. Pero, tal y como lo expresó Gregory BATESON (1972:507): “si entendemos algo, aunque sea poco, de lo que estamos haciendo, acaso nos ayude para encontrar una salida de este laberinto de alucinaciones que hemos creado en torno nuestro”.

Como primera consecuencia del nuevo paradigma emergente, las personas en él iniciadas (minoritarias y heterodoxas de momento) han recuperado la humildad. Una humildad con dos vertientes notables: el atesoramiento de la sabiduría en su diverso despliegue, en cierto modo como hicieron algunas de las ordenes monásticas; y, por otro lado, la conciencia de las limitaciones intrínsecas e inevitables del paradigma de la ciencia racional que culmina en Descartes y de la que, después de todo, seguimos siendo albaceas. *Se vuelve a saber ahora* que no podremos dominar los sistemas cuyas percepciones construimos cuando miramos al mundo. No sabremos predecir su evolución, sus metas, sus orígenes. Pero como contrapartida hemos recuperado la sensibilidad a la que se refería Heisenberg y nos vemos capaces de *participar como parte* en los *procesos* que nos rodean<sup>28</sup>.

En el futuro, deberemos acostumbrarnos al carácter local de las teorías, a su falta de universalidad, a anclarnos a lo que vemos y sentimos y a no colgarnos de lo que abstraemos. En efecto, nuestra *visión* de cualquier porción del mundo puede durante cierto tiempo adoptar casi cualquier ‘forma termodinámica’: ahora en “equilibrio”, después “cerca”, más tarde “lejos”. Las nociones expresadas por

<sup>28</sup> “La opinión de Schrödinger se salía de lo habitual. Que la vida era a la vez ordenada y complicada equivalía a repetir una perogrullada; ver la aperiodicidad como fuente de sus cualidades especiales bordeaba lo místico. En aquella época [cf. Schrödinger (1944)], ni los matemáticos ni los físicos proporcionaron apoyo a la idea.” (Gleick, 1987:299)

los principios de mínima energía potencial, de aumento de la incertidumbre, de producción mínima de entropía y, finalmente, el caos como productor de fenómenos, pueden, cada uno a su vez, ser adecuados en espacios y tiempos determinados. En consecuencia, la economía de medios, la mínima producción de residuos y la autoorganización a lo largo de los procesos aparecen así como valores sugerentes (pero no determinantes) que podrían guiar (si así lo decidiéramos) nuestra participación vital, pensándonos definitivamente dentro de la Naturaleza, partes del todo y no contra él.

El despliegue en cada clase de sistema de la ley de la entropía tiene por sí mismo muy diversas consecuencias. Y entre las principales debe figura que, para su conocimiento, se exige la consideración del contexto del objeto, y del contexto del contexto, recursivamente, hasta reconstruir la globalidad. En palabras de BATESON (1972:274) otra vez: "hemos aprendido del paradigma del cuerpo en caída libre a enfocar los problemas de una manera peculiar: tienen que simplificarse ignorando la posibilidad o posponiendo la consideración de que el contexto más amplio pueda influir sobre el más restringido. Nuestra hipótesis va en contra de esta regla y se centra precisamente sobre las relaciones determinantes que se dan entre los contextos mayores o menores". Junto a esta cascada sincrónica, se impone también la atención al *proceso* que el sistema pueda seguir, desembarazados del *prejuicio* acerca de la equiprobabilidad de los estados del sistema. Como consecuencia medios y fines deberían integrarse y no separarse. El nuevo hábito lo resume BATESON (1972:173) en buscar la dirección y el valor en el acto escogido y no en las metas definidas: en cierto modo, la "racionalidad teleológica cartesiana, sin la ayuda de fenómenos como el arte, el sueño y otras formas de inteligencia irracionales [en el sentido estricto de *no racional*], será ciertamente patogénica y destructora de la vida; su virulencia surge específicamente de la circunstancia de que la vida depende de circuitos interconectados de contingencias, en tanto que la conciencia sólo puede ver pequeños arcos de aquellos circuitos que interesan a la actividad humana".

Mientras que el viejo paradigma contempla el mundo de la sustancia, sólo puede percibir fuerzas e impactos, sin invocar ni diferencias ni ideas. El nuevo paradigma restituye las formas y la comunicación a través de flujos entre ellas. Su emergencia en áreas de conocimiento tradicionalmente diferentes, antiguamente enfrentadas, muestra que la analogía entre las formas (en vez de la *reducción* analítica de cada una de ellas) es legítima y útil<sup>29</sup>. De este hecho,

surge la posibilidad de multiplicar las claves interpretativas (y no de reducirlas), a través de fecundas recombinaciones interdisciplinares. Baste citar a este respecto como el algoritmo de recocido simulado (y en consecuencia la mecánica estadística que imita) permite construir un plano de comprensión especialmente verosímil de la arquitectura vernácula (esa forma peculiar que Christopher Alexander —cit. por STEADMAN, 1979:210-223— contrapuso a la arquitectura "académica"). La arquitectura vernácula no sería sino un proceso de ensayo y error provisto de un *mecanismo de comparación globalizador* —contrapuesto al enfoque *parcelario* del mundo académico—, un proceso que renuncia desde el principio a la conciencia total por la contrapartida, más factible, de una acción capaz de adaptación y autoorganización. Un proceso que lidera la evolución desde lo disponible (ya sean personas, recursos o tradiciones culturales) y que resulta sensible a los cambios y es, por tanto, adaptativo, y que resurge allí donde las especiales condiciones creadas por el fracaso de la arquitectura "oficial" lo hacen necesario (VÁZQUEZ, 1986).

De la evolución desde el viejo al nuevo enfoque surge una última consecuencia de singular importancia para el papel futuro que han de o podrían jugar las personas con destrezas técnicas —desde la arquitectura o la ingeniería, pero también desde la medicina, la psiquiatría o la enseñanza (ILLICH, 1980). El surgimiento del técnico moderno (y de la tecnocracia después) es una consecuencia tácita de la posibilidad enunciada de *resolver problemas* mediante procedimientos lógico-formales; tal fue el caso de la optimización diferencial. Con el tiempo, este técnico, en que alguna vez se confió para encontrar la *única* solución a un problema dado, se ha hecho fuerte en la escala social y ha devenido en tecnócrata consumado —piénsese por ejemplo en el manejo occidental del problema de la "salud". De hecho, su verdadero origen ha sido olvidado, revestido ahora de una cantidad ingente de conocimientos e información (incertidumbre) sobre las innumerables normas, procedimientos y requisitos que, precisamente, generaciones anteriores de técnicos han ido laboriosamente construyendo. Pero ahora que el nuevo paradigma ha puesto de relieve que nuestros problemas, aquellos que concitan un verdadero interés, no caen en la clase de los resolubles (para los cuales no puede negarse la superior conveniencia del procedimiento técnico) sino en la de los intratables o en la de los indecibles, las personas con responsabilidades 'técnicas' deberíamos devolver a la sociedad la capacidad de decidir sobre la solución a elegir entre las innumerables que podamos señalar. En el ejemplo de la explotación minera, sólo

<sup>29</sup> "En ninguna parte es más perceptible esta contradicción [entre la actividad de investigación y la socialización de esta actividad] que en la difícil distinción entre espíritu reduccionista y espíritu analítico. Una de las conclusiones más importantes de la física de los procesos es que el análisis no está en contradicción con el respeto de las singularidades [...] El análisis no concluye [...] forzosamente que el sistema 'no es mas que eso'

o que no es 'nada más que aquello', sino 'todo' eso y podría ser aún muchas otras cosas. Por el contrario cuando vemos la puesta en práctica de ciertas modelizaciones concretas, llegamos a la conclusión de que el reduccionismo es capaz de sobrevivir y de conservar su poder en cualquier cuadro teórico. Su verdadero motor, en efecto, no es tal o cual teoría, sino la temible posibilidad de ignorar, de despreciar, de manipular y de dominar." (Stengers, 1993:55)

la *asamblea* de las personas que han de enfrentarse a los riesgos debiera decidir sobre el procedimiento elegido, dado que la técnica sólo a lo más puede desechar algunos procedimientos como peores, pero no elegir *racionalmente* ese mejor entre todos que ciega-mente se busca (y que no existe). De este modo, el nuevo paradigma deshace la diferencia entre técnico y tecnócrata: no hay ninguna mientras el técnico siga pensando que en las reglas de su arte encontrara el camino para *guiar* a sus semejantes a la 'mejor' de las metas posibles.

En todo caso, no debe olvidarse el lado pesimista del nuevo paradigma<sup>30</sup> que sintetizaré una vez más con palabras de Gregory BATESON (1972:517): "al igual que existe una ecología de las malas hierbas, existe una ecología de las malas ideas, y desafortunadamente una característica [del actual sistema] es que el error básico se propaga."

## Referencias

- Arnheim, Rudolf  
1971 *Entropy and Art*. Berkeley: University of California Press.
- Atkins, P.W.  
1984 *La segunda ley*. Barcelona: Prensa Científica, 1ª ed. castellana.
- Bateson, Gregory  
1972 *Steps to an Ecology of Mind*. New York: Chandler Publishing Co. (tr. castellana: *Pasos hacia una ecología de la mente*. Buenos Aires: Planeta, 1991).
- Boltzmann, Ludwig  
1905 *Populäre Schriften*. Leipzig: Barth (se cita la tr. castellana: *Escritos de mecánica y termodinámica*. Madrid: Alianza, 1986).
- Dupuy, Jean Pierre et Tomás Ibáñez  
1993 "Orden, desorden y autoorganización. Entrevista a Jean Pierre Dupuy", *Archipiélago*, nº 13, pp. 56-64.
- Duve, Christian de  
1984 *La célula viva*. Barcelona: Prensa Científica, 1ª ed. castellana, dos volúmenes.
- Eco, Umberto  
1968 *La definición del arte*. Barcelona: Planeta-Agostini, ed. castellana de 1985.
- Einstein, Albert  
1952! *Relativity*. New York: Crown Publishers, English translation, 15th edition.
- Escohotado, Antonio  
1993 "Caos como regeneración política", *Archipiélago*, nº 13, pp. 35-38.
- Estevan, Antonio  
1983 "Nuevas transformaciones de las estructuras industriales", *Economía industrial*, nº 230, pp. 101-112.
- Fernández-Rañada, Antonio  
1986 "Movimiento caótico", *Investigación y Ciencia*, nº 114, pp. 12-23.
- Freedman, Daniel Z. et Petern van Nieuwenhijzen  
1985 "Las dimensiones ocultas del espacio-tiempo", *Investigación y ciencia*, nº 104.
- Gleick, James  
1987 *Caos—Making a New Science*. s.d. (se cita la tr. castellana: *Caos. La creación de una ciencia*. Barcelona: Seix Barral, 2ª ed, 1994).
- Goldberg, David E.  
1989 *Genetic Algorithms in Search, Optimization & Machine Learning*. Reading (Mass.): Addison-Wesley.
- Guerrien, Bernard  
1992 "Las bases de la teoría económica", *Investigación y ciencia*, nº 192, pp. 64-69.
- Heisenberg, Werner  
1955 *Das Naturbild der heutigen Physik*. Hamburg: Rowohlt Verlag (2ª ed. castellana: *La imagen de la naturaleza en la física actual*. Barcelona: Ariel, 1976).
- Holland, John H.  
1992 *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Cambridge (Mass.): The MIT Press.
- Holland, John H.  
1992a "Algoritmos genéticos", *Investigación y ciencia*, nº 192, pp. 38-45.
- Ibáñez, Jesús  
1993 "El centro del Caos", *Archipiélago*, nº 13, pp. 14-26.
- Illich, Ivan  
1980 "Vernacular values", en *The Schumacher Lectures*. Bideford (Devon): The Schumacher Society (tr. castellana: *Para Schumacher*. Madrid: Blume, 1981).
- Kauffman, Stuart A.  
1992 "Anticaos y adaptación.", *Investigación y ciencia*, nº 184, pp. 46-53.
- Kropotkin, P.  
1892 *La conquista del pan*. s.d.: se cita la edición castellana de Júcar, Madrid, 1977.
- Kuhn, Thomas S.  
1962 *The Structure of Scientific Revolutions* s.d.: (se cita la versión castellana: *La estructura de las revoluciones científicas*. Mexico: FCE, 1962)

<sup>30</sup>Sobre como la teoría del caos no ha cambiado nada en la corporación tecnocientífica, que se apresta a su 'gestión', véase Dupuy et Ibáñez (1993), López (1993:106).

- Lizcano, Emmanuel  
1993 "El Caos en el pensamiento mítico", *Archipiélago*, nº 13, pp. 70-84.
- López Petit, Santiago  
1993 "Las travesuras de la diferencia", *Archipiélago*, nº 13, pp. 99-106.
- Lovelock, James  
1992 *Gaia. Una ciencia para curar el planeta*. Barcelona: Los libros de integral.
- Margalef, Ramón  
1980 *La biosfera. Entre la termodinámica y el juego*. Barcelona: Omega.
- Margalef, Ramón  
1995 "La ecología, entre la vida real y la física teórica", *Investigación y ciencia*, nº 225, pp. 66-73.
- Martín Senovilla, José María  
1991 "Singularidades en relatividad general", *Investigación y ciencia*, nº 173, pp. 18-41.
- Naredo, José Manuel  
1987 *La economía en evolución*. Madrid: Siglo XXI Ediciones.
- Parra, Fernando  
1993 "La ecología como antecedente de una ciencia aplicada de los recursos", en *Hacia una ciencia de los recursos naturales*. Madrid: Siglo XXI, Naredo, Jose Manuel et Fernando Parra (eds.), 1993, pp. 1-28.
- Penrose, Roger  
1989 *The Emperor's New Mind*. s.c.: Oxford University Press (se cita la tr. castellana: *La nueva mente del emperador*. Madrid: Mondadori España, 1991).
- Prigogine, Ilya et Isabelle Stengers  
1984 *Order Out of Chaos*. New York: Bantam Books.
- Rueda, Salvador  
1996 "Metabolismo y complejidad del sistema urbano a la luz de la ecología", en *Ciudades para un futuro más sostenible*. Madrid: MOPTMA, Arias Goytre, Félix et alii (eds.), 1996, pp. 57-67.
- Qvortrup, Lars  
1993 "The Controversy over the Concept of Information", *Cybernetics & Human Knowing*, v. 1, nº 4.
- Sáez, Javier  
1993 "Caos y tiempo", *Archipiélago*, nº 13, pp. 93-98.
- Serres, Michel  
1977 *Hèrmes IV. La distribution*. Paris: Minuit (se cita la tr. castellana del prefacio: "La distribución del Caos", *Archipiélago*, nº 13, 1993, pp. 27-33).
- Schrödinger, Erwin  
1944 *What is life?* London: Cambridge University Press (se cita la reimpression combinada con: *Mind and Matter*. London: Cambridge University Press, 1967).
- Steadman, Philip  
1979 *The Evolution of Designs*. London: Cambridge University Press (se cita la tr. castellana: *Arquitectura y naturaleza*. Madrid: Blume, 1982).
- Stengers, Isabelle  
1983 "Tortugas hacia abajo...", *Archipiélago*, nº 13, pp. 14-26, 1993; (tr. castellana de un texto francés de 1983).
- Vázquez Espí, Mariano  
1986 "Siete malentendidos alrededor de la arquitectura vernácula", en *La tierra, material de construcción*, Soria: Interacción, pp. 199-210.
- Vázquez Espí, Mariano  
1994 *Recocido simulado: un nuevo algoritmo para la optimación de estructuras*. Madrid: Universidad Politécnica, tesis doctoral, AA 1994/95.
- Vivar, Alejandro  
1996 Conversación personal.