



Federación Española de Sociedades de
Profesores de Matemáticas



Sociedad Castellano Manchega de
Profesores de Matemáticas

ACTAS DEL CONGRESO DE MATEMÁTICAS XII JAEM

CONFERENCIA

JORGE WAGENSBERG

EMERGENCIA DE LAS FORMAS EN LA NATURALEZA

El conocimiento empezó siendo **adisciplinario** sencillamente porque fue anterior a las disciplinas. Las disciplinas emergen a medida que se avanza en la construcción del saber y, no hay duda, la primera bifurcación importante se produce entre, digamos, ciencias y humanidades. Las ciencias son humanidades, de acuerdo (me adelanto a una protesta provocada), pero aquí se distinguen ambas por algo esencial. La ciencia, nombrada como tal, acepta seguir los principios básicos del método científico tanto como sea posible. La filosofía o el arte, en cambio, no tienen esta servidumbre. Los griegos antiguos, por ejemplo, no concedían a la evidencia experimental un papel prioritario (prioritario por ejemplo a una autoridad consagrada y prestigiosa del pensamiento). No es extraño entonces que ciencia y filosofía, tal como hoy las entendemos, tuvieran entre sí una frontera más que difusa. Las disciplinas (o dominios del saber) son necesarias para acordar métodos de investigación y para aceptar una memoria común de datos, ideas, observaciones y experiencias ... El saber formal avanza disciplinariamente, no hay duda. Y la estructura de las disciplinas llega a ser jerárquica y con fronteras mutuas progresivamente finas: Física, física de la materia condensada, física de las transiciones de fase, física de los materiales con memoria de forma, la física con la biología, la antropología con la genética, la arqueología y la paleontología, la psicología con la psiquiatría, la neurología y la física cuántica, ...

Sin embargo, esta tendencia imparable y necesaria hacia la fragmentación disciplinaria, deja muchos huecos en el camino. Cada hueco clama por un pensamiento interdisciplinario. De la **adisciplinarietà** a la **interdisciplinarietà**. En ciencia, el conocimiento formal crea disciplinas y el conocimiento informal las conecta, las deshace o crea otras nuevas.

Sin embargo, en todas las formas de conocimiento que no admiten universalmente el conocimiento científico, el proceso ha sido casi al revés. Las disciplinas de la filosofía o del arte, por ejemplo, son tan variadas y complejas como las científicas, pero siempre han estado intensamente comunicadas, siempre se han influido mutuamente a través del espacio y del tiempo (la pintura con la música, la poesía con la filosofía, la ética con la lógica, la pintura con la metafísica, la escultura con la ontología, el cine con la semiótica, ...) El conocimiento que limita su método al método científico más integra que disgrega. Se puede decir de hecho, que la ciencia más bien fragmenta y que las humanidades más bien integran. Que las ciencias disciplinan y que las humanidades indisciplinan. Por la misma razón, el sueño de la ciencia es interdisciplinar y el sueño de las humanidades es encontrar un camino para encontrarse con la ciencia.

A veces ocurre. Pero ocurre cuando ocurre. El Renacimiento es la situación paradigmática a la que hacemos referencia. Los artistas y los científicos atienden los unos a los otros, se estimulan mutuamente. Ocurrió también en Viena poco después de estrenar el siglo. Nos preocupa cuando no ocurre y nos congratulamos cuando ocurre. No parece haber una política cultural ministerial o municipal capaz de provocar una situación así. Sencillamente ocurre cuando se dan ciertas condiciones (¿Qué condiciones?).

Es en este tipo de situaciones cuando se suele acuñar un término nuevo, un término nuevo para una situación deseada no propiamente nueva. Se habla entonces de “La nueva Alianza”, “La ciencia ES cultura” o, como ahora, de “La Tercera Cultura”. Los matices son distintos, la esencia es la misma. Los científicos avanzan especializándose y disciplinándose ocupándose cada vez más de menos. Los humanistas se extienden ocupándose cada vez menos de más. Alguien propone entonces que bajo “La Tercera Cultura” renazca un fuego cruzado de ideas. La iniciativa en este caso corresponde a un editor impetuoso y provocador, John Brockmann, autor del libro **La Tercera Cultura**. y el matiz en su caso no es del todo amistoso con los humanistas. En el fondo de su propuesta late un mensaje Parecido a “Los intelectuales de hoy son los científicos” o “Ahora les toca a los científicos”.

La pregunta es ¿Vivimos de verdad una situación de fuego cruzado de ideas del conocimiento? O, por lo menos, ¿Es eso cierto en ciencia?

Ha habido por lo menos un tema en el siglo XX, que ha tenido la virtud de clamar por un clima interdisciplinario, aunque sea empezando en el interior de la ciencia: el concepto de ser vivo. La biología declara que es una disciplina dedicada al estudio de los seres vivos, pero parece claro que es necesario salir de tal disciplina (la biología) para definir tan resbaladizo concepto (ser vivo). Ha habido varios intentos de explicar la complejidad viva en los últimos tiempos (**Termodinámica del No Equilibrio, Teoría de la Información, Caos, Teoría de las Catástrofes, Teoría de las Fractales, Autopoyesis, Sinérgica, ...**). Lo que sigue es un intento más. Pero la idea es nueva y de ella se

desgrana todo un sistema conceptual en el que caben términos como **complejidad, Anticipación, Incertidumbre, Acción, Evolución y Progreso.**

1. El individuo vivo frente a la incertidumbre de su entorno

Cualquier *objeto* real divide el *mundo* en dos partes : él mismo y el resto del mundo. Ambas porciones universales pueden influirse mutuamente a través de una superficie común real o imaginaria: la *frontera*. Cambios en uno inducen cambios en el otro. Algunos objetos de este mundo, muy pocos, exhiben una rarísima propiedad: tienden a independizarse de la incertidumbre de su entorno. ¿Qué resulta de esta tendencia? Pues nada menos que perpetuar la identidad de una individualidad. Y, para así hacerlo, tales sistemas intercambian con su entorno tres cosas: materia, energía e información. Son los individuos vivos. La frontera juega un papel trascendente en el intercambio, por lo que en todo individuo distinguiremos tres partes: **el interior, la frontera y el entorno**. La definición es nueva:

Un individuo vivo es una parte del mundo que tiende a independizarse de la incertidumbre del resto del mundo.

Hay tres claves en esta definición. La primera es que el sujeto de la definición es un **individuo** vivo y no una parte o una simple colección de individuos. Ello no descarta, claro, que la asociación de dos o más individuos puedan llegar a dar lugar a un nuevo individuo vivo. Como veremos, crear una nueva identidad, aunque sea en otro orden jerárquico es, de hecho, un buen recurso para perpetuar la calidad de **vivo**. La segunda clave está en que la relación del individuo con su entorno no se define con la idea de adaptación sino que se usa la idea de **independencia**, un término que tiene un nítido significado a la hora de hablar de la estabilidad de un sistema y de sus eventuales interacciones con su mundo exterior. Un pedazo de materia inerte, por ejemplo, se calienta mansamente cuando en su entorno inmediato aumenta la temperatura. Se adapta. Un ser vivo, en cambio, tiende a reorganizarse para que su temperatura se mantenga como si en el entorno no hubiera ocurrido nada. Cambia para que nada cambie. La clave **independencia** proporciona a la clave **individuo** su verdadero sentido. Pero la tercera es la clave de las claves: consiste en elegir la **incertidumbre** como el aspecto relevante del entorno (y no tanto el entorno en sí mismo). Lo trascendente no es atender y responder a unas fluctuaciones concretas y determinadas del entorno, sino tener la capacidad para encajar las fluctuaciones de un entorno en principio caprichoso e imprevisible. Resulta fácil inventar una máquina que anule los efectos de unas perturbaciones conocidas de antemano y muy difícil construir una máquina que se defienda de la incertidumbre.

Veamos lo que esta nueva manera de ver las cosas puede dar de sí para comprender la complejidad que observamos en los sistemas vivos. La esperanza es dar con un nuevo esquema conceptual con el que enfocar las ambigüedades y confusiones tan frecuentes en el discurso darwinista. En primer lugar, completaremos la definición de individuo vivo con cinco conceptos que habrán de ser de gran ayuda a la hora de describir la identidad de un ser vivo. Luego exploraremos el campo de alternativas que tiene un sistema para no perder, mantener o incluso aumentar su independencia respecto del

entorno y, finalmente, a modo de ilustración, trataremos de poner a prueba las conclusiones con alguna realidad fácilmente observable de los individuos vivos, por ejemplo con la más visible: la forma. En efecto, los seres vivos exhiben formas más simples y más complejas, pero hay algunas que aparecen con más frecuencia que otras. Quizá encontremos nuevas pistas para comprender esta cuestión.

Los cinco conceptos relevantes del individuo vivo

Sea un individuo que tiende a perpetuar una cierta independencia respecto de las fluctuaciones azarosas de su mundo exterior. Sea pues un ser vivo. Por cierto ... ¿qué es lo que hay que mantener independiente de la contingencia ambiental? Bien, pues aquello que le identifica como individuo: su identidad, es decir, aquel conjunto necesario y suficiente de propiedades que permita afirmar que el individuo vivo en cuestión sólo es idéntico a sí mismo. No es fácil definir un conjunto así. Ni siquiera sabemos cuales son las propiedades relevantes y si la proeza de determinarlas es o no una tarea finita. Pero no nos torturemos. Acordemos por lo menos qué es lo que queremos saber de la identidad de un individuo vivo. Sabemos, por ejemplo, que su interioridad no basta. Un individuo vivo es su interior, su frontera y su entorno (por lo menos su entorno más o menos inmediato). El texto completo de su identidad genética tampoco bastaría. Algunas de las propiedades, o familia de propiedades, tienen que enfocarse desde el entorno y desde la frontera. A continuación se propone una manera de abordar la cuestión.

Cualquier individuo vivo, desde una bacteria a un ecosistema admite una aproximación según cinco conceptos. Los dos primeros son **la estructura** y **la composición** y tienen que ver, sobre todo, con el interior del individuo; el tercero es **la integridad** y afecta sobre todo a su frontera; y los dos últimos son **la diversidad** y **la inteligibilidad** que sólo tienen sentido desde el entorno que lo acoge.

La estructura tiene que ver con una partición relevante del individuo en subpartes así mismo relevantes. El resultado es un Todo y unas Partes en Interacción. Cuando ésta última existe (cuando no es nula) entonces resulta que el Todo no es una adición simple de las Partes. No es lo mismo una sopa de bacterias independientes que un tejido de células fuertemente ligadas por lazos físicos y por una actividad común bien trabada. No existen individuos vivos sin una partición relevante. La vida no es una sopa o una película continua derramada sobre el suelo terrestre. No existen individuos vivos sin estructura o, dicho de otro modo, para estar vivo se necesita una complejidad estructural mínima.

La composición es el concepto siguiente y se refiere a la distribución de materia a nivel atómico o molecular. Las partes y sus respectivas interacciones tienen un soporte material y ponen en juego unas transformaciones de la materia singulares. No hay individuos vivos homogéneos o de composición arbitraria. Ciertos átomos y ciertas moléculas son mucho más frecuentes que otros según la distancia que tomemos entre diferentes identidades. La composición se aplica a la estructura.

La integridad es el concepto que expresa la individualidad misma del individuo, su unidad, su coherencia. No todo pedazo de materia viva es un individuo vivo. Haciendo honor a nuestra definición inicial, la individualidad tiene que ver con el grado de

dependencia respecto del resto del mundo. Así, un pedazo de hígado es una individualidad más dudosa que un hígado, un hígado más que un organismo entero y éste último menos que un grupo de organismos, ya sea una familia, una manada o una población. La integridad de un individuo puede expresarse por cualidades propias de su frontera, como el tamaño o la forma ... Para ser un individuo vivo se necesita una integridad mínima de la estructura y composición definida dentro de cierta forma. Por extensión se puede hablar de la integridad de las Partes relevantes de un Todo.

La diversidad, es un concepto externo, que mide la variabilidad de las integridades según un criterio de clasificación preacordado. Tampoco se puede ser un individuo vivo sin una mínima diversidad en la estructura, en la composición y en la integridad. Se puede construir la Torre Eiffel con piezas idénticas y de un solo material. Pero, por compleja que sea una estructura creada por este procedimiento, nunca logrará independizarse de su entorno, nunca logrará vivir. No existen ecosistemas de sólo conejos. La diversidad se aplica a la integridad, la composición y la estructura.

La inteligibilidad es el quinto concepto y afecta al individuo vivo visto desde el resto del mundo. La inteligibilidad se aplica a todo lo demás: a la diversidad, a la integridad, a la composición y a la estructura. La inteligibilidad siempre tiene que ver con alguna clase de reducción, de compresión, con la indicación de que dos cosas aparentemente distintas comparten alguna clase de esencia común. ¿Por qué una propiedad de un individuo vivo (una interacción, un tamaño, una forma, ...) es como es y no de cualquier otro modo? En este punto vamos a utilizar la **selección natural**, una idea darwinista que, en el contexto de la definición propuesta, la enunciamos así:

La selección natural es un filtro que deja pasar todo aquello que favorece la independencia del individuo respecto de la incertidumbre de su entorno.

Discutiremos en seguida el alcance de esta definición. Digamos de momento que, para que algo sea seleccionado (o filtrado según el criterio de independencia), primero tiene que acceder a la realidad, tiene que existir, ¡tiene que estar ya ahí! Pero no basta con que algo emerja para que ese algo apruebe el examen evolutivo a la primera. Digamos que se combinan dos probabilidades distintas, una de emergencia ligada a las condiciones actuales del entorno y otra de selección, ligada a la independencia del individuo respecto de la incertidumbre de tales condiciones. Por ejemplo: La inteligibilidad de una forma de simetría esférica en un individuo vivo sería la combinación de una **inteligibilidad necesaria**, debido, digamos, a una isotropía radical del ambiente (que genera muchas cosas redondas) y de una **inteligibilidad funcional** por, digamos, lo difícil que resulta, para muchas fauces, morder una esfera, o lo interesante que puede resultar el tener la mínima superficie posible en la frontera con el entorno. No se puede ser un individuo vivo sin una mínima inteligibilidad respecto del entorno que le ha tocado en suerte.

La inteligibilidad de una forma es una particular combinación de su necesidad y de su función. En la **necesidad** intervienen las condiciones del entorno favoreciendo la emergencia de una forma o forzando la modificación de una que ya ha nacido. La necesidad depende del mapa de las fuerzas y contingencias presentes en el entorno y de las dinámicas compatibles con tal situación [2]. La necesidad aumenta así la frecuencia de una forma en la naturaleza. En la **función** las condiciones del entorno intervienen de otro modo: favorecen una forma en particular (que ya es frecuente por necesaria) si ésta

contribuye, además, a la independencia del individuo . Sólo queda un matiz por explorar. Se trata de un matiz esencial: ¿qué alternativas tiene un individuo vivo para mantener o mejorar (perder o empeorar) su independencia respecto a la incertidumbre del entorno?

Desde Darwin y desde Thomson se han desarrollado muchas disciplinas científicas, sobre todo la termodinámica de sistemas abiertos en no equilibrio y la matemática de la información, que pueden ayudar a replantear esta pregunta y, no está descartado, que pueden dar quizá también alguna respuesta. Veamos en primer lugar cuales son estos fundamentos.

2. Dos ecuaciones fundamentales para seguir vivo

Sea un individuo vivo. ¿Cómo seguir siéndolo? La proeza parece consistir en un complejo conjunto de procesos fisicoquímicos finamente entramados. Sin embargo, ni el término *individuo*, ni el término *vivo* son directamente inteligibles desde las leyes que regulan tales procesos. Un primer mérito de la definición inicial consiste, justamente, en que ésta conecta *individuo* con *identidad*, por un lado, y *vivo* con *independiente*, por otro. Con esto nos cambiamos a otros dos conceptos que son menos metafóricos para aludir a los cambios e intercambios de materia, energía e información de un sistema con el entorno. *Conservar la identidad* significa sin duda muchas cosas pero significa, como mínimo, que los valores de las magnitudes físicas que representan la estructura y la composición del sistema no se salgan de cierto intervalo de tolerancia.

Empecemos por reconocer una dificultad. La *materia* y la *energía* son, en física, magnitudes de gran prestigio. Intervienen en casi todas las teorías y, desde luego, en las ecuaciones de las leyes más fundamentales y creíbles. Los físicos se han habituado a verlas juntas en sistemas y procesos, en las mismas ecuaciones (desde la de Gibbs en termodinámica hasta la de Einstein en relatividad), manejan cómodamente equivalencias mutuas y no tienen problemas para considerar transformaciones de la una en la otra y para seguir sus mutuas dependencias, ... La *información* tiene una tradición mucho más reciente, pero no en la física, sino en la matemática. La información también adquiere rango de magnitud y aparece en ecuaciones fundamentales, aunque, atención, no de leyes de la naturaleza sino de una nueva disciplina aparecida en la segunda mitad del siglo, la Teoría de la Comunicación. ¿Dónde está entonces la dificultad? Pues en el abismo que todavía separa *energía* y *materia*, por un lado, y la *información*, por otro. Una buena Teoría de la Complejidad (el gran sueño de la ciencia actual sin duda) quizá deba anclarse en una ecuación que dé cuenta del intercambio de las tres cantidades entre el sistema complejo y su entorno. Pero, de momento, hemos de recurrir a lo que tenemos. Y, como vamos a ver, lo que tenemos puede dar mucho de sí. Lo que tenemos no es una ecuación sino dos. Una de la física para el intercambio de materia y energía y otra de la matemática para el intercambio de información.

La ecuación fundamental del intercambio de materia y energía

La primera, llamada balance de entropía de un sistema abierto con su entorno [3,4,5], pone en juego tres conceptos, se puede aplicar directamente a un individuo vivo y se verbaliza así :

La variación de la identidad de un individuo (su estructura y composición) es el resultado de la actividad de éste para alejarse del equilibrio termodinámico (conjunto de los procesos fisicoquímicos que se desarrollan en su interior) más su intercambio de materia y energía con el exterior.

o más brevemente:

El cambio de la identidad es igual a la actividad más el intercambio.

La grandeza de esta ecuación de balance es que relaciona tres conceptos de tres relevancias bien diferentes. El primero se encarga de medir el cambio en la identidad del individuo y a él podemos exigirle no superar cierto valor, por encima del cual se perdería, justamente, tal identidad. (El individuo vivo ya tiene algo que defender). El segundo se refiere a todo aquello que acontece en el interior del individuo y su valor obedece al celeberrimo Segundo Principio de la Termodinámica: si no ocurre nada (o lo que es lo mismo, si todo lo que podía ocurrir ya ha ocurrido), entonces este término es nulo; en cualquier otro caso (si todavía puede ocurrir algo), entonces el término es siempre positivo. De estos dos términos se extrae ya una conclusión contundente: Cualquier actividad interna afecta a la identidad, pero ¡no hay ninguna actividad interna que pueda deshacer tal efecto! Pero ahí está el tercero término del balance para arreglar las cosas. Se refiere al trasiego con el exterior y a la importación y exportación de materia y energía. Representa la oportunidad para **actuar** fuera y compensar así el precio ineludible de la actividad interior.

Un sistema aislado de su entorno se ve arrastrado por sus condiciones de aislamiento, es decir, no tiene más remedio que cambiar hasta que ya nada puede cambiar. El individuo se instala en ese único posible estado final, el de equilibrio termodinámico, y allí consigue por fin, sí, es verdad, una independencia radical de los caprichos de su entorno. Pero la identidad de tal estado corresponde al de la máxima homogeneidad y mínima estructura. Es un estado muy lejos de la identidad propia del individuo vivo. El individuo ya no es el que era, ha perdido su identidad. Lo que ha conseguido es un estado de sólida permanencia en la muerte. Es el tedio de la muerte térmica. Lo vivo huye del aislamiento o, como veremos, recurre a él sólo parcial o temporalmente. Un sistema inerte, es decir, sin actividad, no tiene más remedio que seguir mansamente las fluctuaciones del entorno. Es la máxima dependencia, la de una roca cuya temperatura cambia más de cuarenta grados entre el día y la noche. Esta situación termodinámica tampoco puede representar a un individuo vivo más que en aproximaciones muy provisionales y especiales. Un individuo vivo debe **trabajarse** su independencia cada instante de su vida.

La ecuación fundamental del intercambio de información

La segunda ecuación es de hecho una identidad matemática de la Teoría de la Comunicación. Pone en juego cuatro conceptos sobre la información que fluye entre dos fuentes de información, digamos la fuente X y la fuente Y. Puede enunciarse de esta forma [6]:

La información que emite X menos la información que emite X conocido lo que llega a Y, es igual la información que llega a Y menos la información que llega a Y conocido lo que ha salido de X.

El primer término, **la información que emite X**, es una medida de la diversidad de los estados accesibles a esta fuente, esto es, depende de la colección de símbolos que puede emitir y de la frecuencia con la que los emite. El término es nulo, por ejemplo, para un alfabeto de una sola letra.

El segundo término, **la información que emite X conocido lo que recibe Y**, es una medida de la diversidad de la colección de estados accesibles a esta fuente condicionada por la colección de estados accesibles a la otra. Es decir, se trata de la información que saliendo de la fuente X, nunca llega a la fuente Y. Este término se llama también **equivocación**. Si el canal de información entre las dos fuentes es totalmente transparente, la equivocación es cero. Si el canal es totalmente opaco e impermeable, la equivocación es máxima y equivale a la información emitida en X. La realidad de cada caso está, claro, entre ambos límites, según sea el **ruido** del canal que une ambas fuentes.

Lo mismo puede decirse, simétricamente, de los términos tercero y cuarto, cambiando el nombre de la fuente X por el de la fuente Y. La fuerza de esta ecuación (identidad matemática) radica en el significado de los miembros de la igualdad. ¿Qué significa la diferencia: información de la fuente menos su equivocación? Pues nada menos que la **información neta** que circula entre ambas fuentes. De modo que lo que expresa la ecuación es equivalente a decir que la información que circula entre las dos fuentes es la misma en cualquiera de sus dos sentidos (de X a Y o de Y a X).

Ya tenemos lo que nos faltaba, una manera de formalizar el intercambio de información entre un individuo y su entorno. Basta con un leve soplo interdisciplinario que permita reinterpretar la ecuación. Y aquí está ese soplo: ¿Por qué no considerar individuo y entorno como sendas fuentes de información? Tanto uno como otro tienen estructura y composición y una buena colección de estados accesibles que pueden ¡y así lo hacen! influirse mutuamente. ¡Sea X el individuo vivo y sea Y su entorno! Rescribamos la ecuación fundamental [7]:

La complejidad de un individuo más su capacidad de anticipación respecto del entorno, es igual a la incertidumbre del entorno más la acción sobre éste del individuo.

Reinterpretamos. El primer término mide ahora la variabilidad de estados accesibles al individuo vivo, su complejidad. Es una medida de su identidad. Llamémosle **complejidad del individuo vivo**. Si por ejemplo hablamos de colores, el término será casi nulo para un oso polar, ligeramente mayor para una cebra y mucho más grande para un ecosistema como el arrecife de coral.

El tercer término es el homólogo pero referido al entorno. Mide la variabilidad de estados accesibles al entorno, su complejidad. Aunque a más de uno se le antojará “biocéntrico”, llamemos a esta cantidad **incertidumbre del entorno**. Si hablamos de colores, el término será casi nulo para un paisaje ártico y enorme para un jardín botánico en flor. Si hablamos de estados atmosféricos posibles, entonces será mayor la de una selva tropical que la de un gran desierto. Va a ser un término de gran valor para

la definición de individuo vivo, ya que da cuenta directamente de la caprichosidad de las fluctuaciones ambientales.

El segundo término (con el signo menos incluido) mide la variabilidad de estados accesibles (o complejidad) de un individuo vivo, una vez fijados (conocidos) los estados accesibles al entorno. Llamemos a este término, aunque parezca un abuso de lenguaje **la capacidad de anticipación del individuo** respecto de su entorno. La de una lombriz, capaz de detectar tan sólo ciertos cambios groseros de humedad o de luz ambiental, será muy pequeña. La de una torre de control de un aeropuerto en cambio, será muy grande.

El cuarto término (con el signo menos incluido) mide ahora la variabilidad de estados accesibles al entorno, una vez fijados (conocidos) los estados accesibles del individuo. Podemos llamar a esta cantidad **acción sobre el entorno del individuo**. Puede tener el sentido directo de **impacto ambiental**, muy pequeño en el caso de un inmenso desierto transitado por un solitario beduino o muy grande si se trata de la afluencia masiva de bañistas a una pequeña playa. Pero también puede expresar la movilidad de un individuo dentro de un entorno (capacidad para cambiar de estado del entorno) que, en un mismo paraje, por ejemplo, será mayor para un gorrión que para una oca.

La ecuación fundamental del intercambio de información es inviolable e insoslayable. Si la identidad de un individuo aumenta su complejidad en un entorno determinado, por ejemplo, entonces una de dos, o bien mejora su capacidad de anticipación, o bien contamina menos. Lo mismo ocurre con la ecuación fundamental del intercambio de materia y energía. Si la actividad de un individuo aumenta, por ejemplo, entonces mantener la complejidad de su identidad requiere forzar la emigración de materia y energía al exterior (por eso saca la lengua el perro para jadear mejor después del esfuerzo).

Armados con estas dos ecuaciones fundamentales es el momento de replantear la pregunta con la que empezábamos el apartado.

3. Mapa de alternativas de un individuo vivo para seguir siéndolo

Sea un individuo vivo. ¿Cómo seguir siéndolo? Se trata de mantener la independencia respecto de la incertidumbre del entorno. Según la primera ecuación, la cosa parece muy clara. El individuo ha de alcanzar un régimen termodinámico en el que la actividad se vea exactamente compensada por el intercambio con el exterior. En la termodinámica del no equilibrio esta situación tiene nombre: se llama estado estacionario. La cuestión ahora es ¿cómo garantizar la continuidad de un estado estacionario termodinámico? La física tiene la primera parte de la respuesta. Un estado estacionario depende de unas magnitudes intensivas llamadas fuerzas termodinámicas que el conjunto sistema-entorno logra imponer como constantes en el tiempo. Se llaman ligaduras termodinámicas y el estado estacionario que corresponde a k ligaduras se llama estado estacionario de orden k . Una diferencia de temperatura, por ejemplo, impone un flujo de calor. Mientras se mantenga la diferencia habrá conducción de calor, si nada vigila el mantenimiento de tal diferencia, el calor que fluye se encarga de igualar las temperaturas. Lo mismo podría decirse de la diferencia de densidad de materia respecto del flujo de materia. O de la composición de ambos procesos. Lo mismo puede decirse de la diferencia de potencial

eléctrico respecto de la corriente eléctrica. O de la composición de las tres anteriores. Lo mismo puede decirse de una afinidad química respecto de una reacción. Etcétera.

El estado estacionario de orden k depende sólo de k constantes: las ligaduras termodinámicas entre sistema y entorno.

En particular, el estado estacionario de orden cero corresponde a cero constantes, es decir, cuando no hay ligaduras entre el interior y el exterior, o sea, cuando el individuo está aislado al paso de materia y de energía, cuando no puede influir si ser influido desde el exterior. Sino hay ligaduras que controlar y mantener, entonces no hace falta intercambiar información con el entorno. Esta conclusión no deja de tener cierta consistencia con la globalidad del esquema conceptual que comentamos: sólo existe una situación en la que se puede mantener la identidad sin intercambiar información con el entorno, la de equilibrio, aquella en la que tampoco se intercambia otra cosa. Se trata de una manera pasiva de mantener la independencia de la identidad a costa de que tal identidad sea la “peor” posible para unas condiciones de aislamiento dadas, una identidad precisamente **no viva**. Apresurémonos a decir sin embargo que este caso tiene mucho más interés de lo que parece porque en su proximidad se encuentran muchas formas de vida latente y de soluciones parciales a ciertos problemas. Volveremos en seguida sobre ello.

Lo importante ahora es notar que la información es radicalmente imprescindible para mantener un estado estacionario no trivial (de no equilibrio. Y no sólo eso. Ya sabemos para que ha de servir tal información: para mantener constantes ciertas (k) ligaduras termodinámicas con el entorno. Una ligadura termodinámica (como una diferencia de temperatura, por ejemplo) es una cantidad con un pie en el entorno y otro en el sistema. El individuo, para controlar cada ligadura, necesita cumplir con dos operaciones en perpetuidad circular:

- 1) **Percepción** (anotar el valor actual de la ligadura)
- 2) **Acción** (corregirlo si amenaza la continuidad del estado estacionario)

Este es pues el punto justo de encuentro entre **materia y energía** por una lado e **información** por el otro. Este es el punto de soldadura entre la física y la teoría de la comunicación, la bisagra entre las dos ecuaciones fundamentales, la esperanza creo, para avanzar en la comprensión de la evolución de los individuos vivos. Hay que reconocer que tanto la entropía termodinámica como la entropía de Shannon parecen magnitudes demasiado simples para dar cuenta de la complejidad de una identidad viva. Ninguna de ellas versa sobre nada que pueda nombrarse como el **significado** o **sentido** de las entidades y procesos que intervienen en la gran maraña de la vida. Sin embargo sí pueden conseguir una honrosa descripción de estructuras, composiciones e interacciones, es decir, sí pueden darnos una descripción de mínimos que acaso ya sean necesarios y suficientes para comprender mucho de lo esencial de las formas vivas. En cualquier caso, sólo hay dos opciones: probar la idea ... o no. Y la tentación de probarla es demasiado fuerte si de lo que se trata es ...

Sea un individuo vivo ¿Cómo seguir siéndolo? Con las dos ecuaciones fundamentales conectadas entre sí por el concepto de las ligaduras termodinámicas, podemos preparar

ya un borrador de respuesta. La independencia del individuo tiene tres grandes alternativas :

Independencia Pasiva. El estado estacionario tiende al equilibrio termodinámico y a no intercambiar información con el exterior. La solución es parcial o provisional.

Independencia Activa. El estado estacionario lucha por mantener una distancia al equilibrio termodinámico intercambiando información con el entorno. Representa la vida propiamente dicha de los organismos.

Independencia Nueva. El estado estacionario cambia a otro estado estacionario viable (¿más independiente?). Representa la evolución de los individuos vivos. Profundicemos un poco en cada una.

Independencia pasiva

El estado estacionario tiende al equilibrio termodinámico. De la ecuación fundamental para el intercambio de materia y energía (*La variación de la identidad de un individuo (su estructura y composición) es el resultado de la actividad de éste para alejarse del equilibrio termodinámico (conjunto de los procesos fisicoquímicos que se desarrollan en su interior) más su intercambio de materia y energía con el exterior*) se deducen las dos alternativas prioritarias: anular la actividad interior del individuo o anular su intercambio con el exterior.

El primer caso es la independencia pasiva por *simplificación*. Aquí, al anularse la actividad interior, la identidad del sistema queda a merced de lo que pueda ocurrir fuera. En condiciones muy especiales, tal cosa puede ser soportable. Es el caso de *sistemas* provisionalmente lo bastante simples como las semillas, esporas u y otras formas resistentes, que pueden esperar inactivos la llegada de tiempos mejores. También es el caso de sistemas no tan simples, pero que renuncian a su *actividad* a la espera de una mejora de las condiciones del entorno, como la hibernación, la latencia o el letargo ...

El segundo caso es la independencia pasiva por *aislamiento*. Aquí, al anularse el intercambio, la identidad del sistema queda a merced de su propia actividad interna lo que, al menos parcialmente, puede no ser nada grave. Es *el abrigo*, una manera eficaz de protegerse de ciertas fluctuaciones ambientales más bien previsibles (el pelo invernal, la protección de un nido, de un caparazón blindado, ...) La otra manera de minimizar el efecto del intercambio con el exterior es reducir su efecto local, es decir, en lugar de anular su valor absoluto se reduce su valor relativo a la unidad de masa. Es *la inercia*; una manera eficaz de amortiguar las fluctuaciones del exterior, si el aislamiento es difícil, consiste sencillamente en aumentar el *tamaño*, crecer y ser grande (respecto de las fluctuaciones de temperatura: un vaso de agua o un ratón sufren más la fluctuación de un grado de temperatura que un lago o un caballo y éstos a su vez más que un mar o una ballena; respecto de fluctuaciones del peligro a ser devorado: una ballena depende menos de la incertidumbre del entorno de depredadores que un caballo y éste menos que un ratón); y otra manera es alterar la *forma* de la frontera del individuo con el exterior, en particular reducir la relación volumen-superficie (cuando un pájaro extiende sus alas al sol aumenta dicho parámetro para conseguir lo contrario, aprovechar las fluctuaciones exteriores).

Obsérvese que en ninguno de estos casos importa la información y, por lo tanto, la segunda ecuación fundamental. Algo muy distinto ocurre con la segunda gran alternativa.

Independencia activa

El estado estacionario se mantiene a una determinada distancia del equilibrio termodinámico, una distancia que depende de un número determinado de constantes, las ligaduras termodinámicas. Aquí, además de la ecuación fundamental de intercambio de materia y energía interviene la ecuación fundamental del intercambio de información.

De la primera (*La variación de la identidad de un individuo (su estructura y composición) es el resultado de la actividad de éste para alejarse del equilibrio termodinámico (conjunto de los procesos fisicoquímicos que se desarrollan en su interior) más su intercambio de materia y energía con el exterior*) se deduce que la independencia del individuo requiere exportar al exterior los efectos de la inevitable actividad interior. Hay que controlar las ligaduras fijadas entre el individuo y su entorno, por lo que hay que recibir información tanto del exterior como del interior. La **información del entorno** entra vía **percepción** con datos de aquel relevantes para evitar amenazas a la constancia de las ligaduras (temperatura, concentración y distribución de nutrientes, formas, colores, distancias, movimientos, ...). La **información interna** llega de las subpartes de la estructura del individuo a las que debe acceder con finura y precisión (tal como hace el sistema circulatorio, nervioso, inmunitario, hormonal, ...). Y a continuación se **actúa** sobre el propio individuo o sobre el entorno para corregir o amortiguar cualquier fluctuación peligrosa.

En la ecuación de la información (La complejidad de un individuo (1) más su capacidad de anticipación respecto del entorno (2), es igual a la incertidumbre del entorno (3) más la acción sobre el entorno del individuo (4)) pueden seguirse las alternativas de actuación. Podemos discutir sobre dos de los términos de la ecuación aplicando a los otros dos la definición que hemos acordado. En efecto, seguir vivo significa que el primer término de la ecuación debe mantenerse lo más próximo posible al valor nulo, cualquiera que sea la variación del tercero. Eso y no otra cosa es mantener la independencia respecto de la incertidumbre. El beneficio de estudiar ahora la ecuación es notable. En el diálogo individuo-entorno hay dos alternativas de actuación: acción sobre el entorno y acción sobre el individuo. De los términos restantes de la ecuación uno se refiere justamente al entorno y el otro al individuo. Veamos lo que da de sí.

¿Qué puede hacer el individuo como acción sobre el individuo?

¡Aumentar capacidad de anticipación! Cuanto mayor sea esta facultad más independiente será de la incertidumbre del entorno. A los biólogos no les gusta hoy usar el término “superior”, ni el de “mejora” cuando se refieren a las especies vivas. Pero, al menos en el aspecto que comentamos (y me temo que también en algún otro), una rata está mejor preparada para amortiguar los caprichos del entorno que una lombriz de tierra. El comportamiento críptico es un modo de independizarse de posibles depredadores y está claro que tal cosa se consigue con una buena **información fluyendo** entre el individuo y sus alrededores. El sistema nervioso, los órganos de la percepción, el cerebro y las prestaciones de éste, siguen ciertas líneas evolutivas que no se explican tanto en virtud de una secuencia de selecciones naturales a favor de la adaptación al

medio, sino a favor de una protección contra la incertidumbre de éste. A esta idea se objeta que esto no ocurre con muchas otras líneas evolutivas, que hay formas estancadas, incluso regresivas. Es verdad, pero la presunta objeción encaja también en nuestro esquema conceptual, porque un determinado entorno puede caracterizarse por bajísima incertidumbre. En estos casos la presión sobre el segundo término de la ecuación fundamental de la información se hace insignificante. La independencia - seguir vivo- se garantiza sin necesidad de aumentar la anticipación. Es lo que ocurre en las profundidades abisales de los océanos, donde la temperatura apenas fluctúa, donde la luz es constantemente nula (reino vegetal ausente) y donde todo lo que tiene algún interés viene de arriba, “cae del cielo”, de las capas superiores. La incertidumbre del entorno es casi nula y sus habitantes pueden instalarse y especializarse en cualquier estrategia compatible. Es lo que ocurre en un bosque sin depredadores con abundancia de un alimento que pocos apetece, como el eucalipto. La especialización tiene algunas ventajas respecto del intercambio de materia y energía, sobre todo de costo y eficacia. No hay que ir rápido, no hay que competir, no hay que buscar, no hay que proteger, ... no hay que anticipar. Pero atención, el especialista es sumamente frágil respecto de un entorno poco incierto, cuando ¡ay! éste deja de serlo. De la capacidad de anticipación dependen funciones tales como el movimiento (para comer y para no ser comido), la importación y exportación de materiales (alimentación y excreción) la importación y exportación de energía (disipación de energía, la absorción de calor,...)

...

...

¿Qué puede hacer el individuo como acción sobre su entorno?

Puede hacer dos cosas. El término disponible de la ecuación mide ahora la colección de estados accesibles al entorno una vez fijado el comportamiento del individuo. Por lo que en este caso, el individuo tiene ante sí dos alternativas: Cambiar el entorno a su favor o cambiar de entorno y moverse hacia otro más favorable. De nuevo: cuanto mayor sea esta facultad mejor independencia logrará el individuo respecto de su entorno. La primera alternativa consiste en cambiar la realidad del mundo exterior. A esta facultad se le llama tecnología. Una herramienta, el dominio del fuego, la agricultura o la ganadería son logros que lo que hacen de hecho es justamente independizarnos de las desventajas propias de la incertidumbre del entorno. El fuego, por ejemplo, aumenta la diversidad de nuestra dieta y nos independiza de las tres o cuatro cosas tiernas y blandas que en cada caso podemos ingerir directamente. Lo mismo puede decirse de una economía basada en el dinero respecto de una economía basada en el trueque. Con el dinero no dependemos de los caprichos del cazador o del recolector para subsistir. El abrigo, que antes hemos comentado en su versión pasiva se convierte aquí en genuina arquitectura de nidos, madrigueras y toda clase de maravillosos refugios y construcciones. El otro sentido del término de la ecuación tiene un interés trascendental. Se trata, nada menos, que de la capacidad que tiene un individuo para moverse dentro de su entorno. Cualquier prestación del movimiento puede jugar decisivamente a favor de la independencia del individuo respecto de la incertidumbre. Es curioso notar, por ejemplo, como el comportamiento críptico se puede lograr de maneras que encajan perfectamente aquí. Una es disfrazándose hasta hacerse indistinguible del paisaje inmediato (como hace un camaleón y tantísimas otras especies), pero cuando no se tiene capacidad alguna de disfraz todavía queda la posibilidad de actuar a la inversa, buscar una parte del paisaje que se parezca al individuo y esconderse en él (como hacen tantísimas otras especies).

Del comentario sobre la independencia activa han ido desgranándose ya un buen número de facultades que tienden a favorecer la independencia de los individuos vivos, (como el crecimiento, la movilidad, la tecnología, etc.) de la incertidumbre de ciertos entornos. Podemos llamar a estas facultades funciones y constituyen, como hemos anunciado al principio, la mitad de la inteligibilidad de un individuo vivo. En ellas nos vamos a concentrar en el último apartado, pero conviene destacar aquí que algunas de estas funciones pueden llegar incluso a contradecirse, es decir, a sugerir tendencias opuestas. El crecimiento, la defensa y la movilidad, por ejemplo, llegan con frecuencia a una situación de verdadero dilema. Moverse con agilidad en según que paisajes requiere no ocupar demasiado espacio, así que el crecimiento puede llegar a dificultar la movilidad (como ocurre con la cornamenta de tantos herbívoros). En estos casos la solución es de compromiso. El pacto consiste en enunciar una nueva función que no es crecer ni ocupar poco espacio sino empaquetar, esto es, buscar la manera de reunir la máxima materia en el mínimo espacio (la espiral o la hélice es sin duda un buen pacto).

Independencia nueva

Un estado estacionario termodinámico sirve para mantener una identidad, no tanto para cambiarla. Bien es verdad que si la incertidumbre del entorno “rompe” la identidad del individuo éste cambiará, aunque la probabilidad de que la nuevo individuo sea compatible con el mencionado estado estacionario son muy pequeñas. Acaba de surgir algo muy próximo a lo que Darwin llamara Selección Natural e inmediatamente surgirá de nuevo. En efecto cualquier cambio en el estado estacionario termodinámico, es decir, cualquier cambio en la colección de constantes que ligan al individuo con su entorno, significa una innovación, un estado estacionario nuevo, una nueva independencia.

¿Cómo se puede acceder a un nuevo estado estacionario? Cualquier innovación genera de hecho uno nuevo. Hay por lo menos dos grandes maneras de provocar innovaciones la reproducción y la asociación.

Cualquier error de replicación es una innovación que se propaga con la reproducción, pero sobre todo con la reproducción con sexo, un verdadero generador de variabilidad por combinación de las identidades de individuos diferentes. La reproducción sin sexo no guarda las innovaciones por lo que su poder creador es en principio menor. Pero el nuevo estado, después de emerger, pasa el filtro de la selección. La innovación que recién accede por primera vez a la realidad persiste, tautológicamente, sólo si es compatible con esa realidad preexistente a la que accede. Pero en el esquema conceptual que nos ocupa, la selección natural adquiere un significado nuevo, no tan tautológico y bastante más preciso.

En efecto, la nueva identidad puede ser más o menos independiente de la incertidumbre del entorno. Pero está claro que si lo es más, entonces tendrá más cartas para afrontar la nueva compatibilidad con el entorno. Desde el punto de vista de la evolución biológica, la selección natural es un filtro que hay que atravesar (no una vez sino) continuamente. En la metáfora del filtro intervienen ahora dos conceptos nuevos: la incertidumbre del entorno (1) y su acción permanente, extensa en el tiempo (2). Si la incertidumbre es nula, el individuo que lo pasa una vez quedaría en principio a salvo de cualquier otro examen. El descarte de innovaciones (el número de cambios inviables) aumenta con la

incertidumbre del entorno actual. Las que quedan pueden suponer un aumento de la independencia o, de momento, simplemente “quedarse ahí”. Quedarse ahí hasta que la propia selección las elimine o hasta que, en otro estado del entorno, la innovación sí pase a significar una ganancia de independencia. En otras palabras, con el tiempo, las innovaciones seleccionadas se acumulan. La macroevolución de las especies vivas no puede explicarse a base de una selección natural que verse sobre la adaptación a un momento del entorno, sino a base de una selección natural que versa sobre toda la historia de la incertidumbre del entorno hasta ese momento. Una incertidumbre nula o constante no tiene por qué animar una línea en algún sentido progresiva de innovaciones. Aquí está creo la clave de algunas confusiones del pensamiento actual representados sobre todo por Steven Jay Gould [8]. Resulta que todos los entornos no tienen la misma incertidumbre. Resulta que la incertidumbre de un entorno no tiene por qué mantenerse constante. La evolución de una forma viva no se comprende por su capacidad de adaptación a una clase de entorno, sino por su capacidad de independencia respecto de las variaciones de tal entorno. La llamada presión selectiva no se produce por una competencia ante un reto determinado, sino que es el resultado de un aumento de la incertidumbre del entorno. El concepto de progreso es un concepto que a biólogos como Gould les pone los pelos de punta. Si progresar es ganar independencia respecto de la incertidumbre del entorno [9], entonces ... ¡Claro que hay líneas progresivas y líneas regresivas! Cuando la incertidumbre aumenta, los estados estacionarios viables o han aumentado su capacidad de anticipación (percepción, regulación, cultura, etc.) o han aumentado su capacidad de cambiar el entorno (movilidad, accesibilidad, tecnología, arquitectura, etc.) o han experimentado una buena combinación de ambas cosas. Tales innovaciones significan saltos en la complejidad del individuo y la secuencia de estos saltos ¿por qué no? una línea progresiva. Según la concepción de selección natural propuesta, resulta que no es lo mismo que ésta haya actuado durante un millón de años o que lo haya hecho durante mil millones; y tampoco es lo mismo que el entorno haya sido poco incierto o que lo haya sido mucho. Gould argumenta en uno de sus últimos libros [8] que el aparente aumento de complejidad de los individuos vivos es una ilusión, que si aumenta es porque no puede disminuir. Lo compara a los bandazos aleatorios de un borracho que camina paralelo a un muro: como no puede atravesar el muro, la tendencia es hacia la calzada. La posición de Gould equivale a renunciar a comprender. Por lo tanto ante el dilema de aceptarla o no aceptarla, mucho mejor no aceptarla (es más creativo). Aceptemos en cambio, como hipótesis de trabajo, que el mundo es comprensible (hipótesis fundamental de la investigación científica). Bien, pues basta un vistazo a las dos ecuaciones fundamentales de la termodinámica y la teoría de la información para constatar cómo una aproximación tan simple exige ya una enorme complejidad para la identidad que goce de la independencia más pequeña observable. Una bacteria procariota es ya un individuo de una complejidad gigantesca. ¿Dónde está el muro? Los bandazos no son puramente aleatorios sino que están conducidos por los intercambios de materia, energía e información y filtrados por la incertidumbre del entorno en aras de cierta independencia.

Si la incertidumbre del entorno baja de repente (porque cambia el entorno o porque el individuo ha emigrado a otro menos incierto), entonces sobra independencia que unos conservan y otros pierden. Los que la pierden se especializan por una mera cuestión de eficacia, por esa mera tendencia inmediata a ocupar los mínimos niveles de energía y riesgo. Es el caso notorio y espectacular de las famosas anguilas jardineras que, habiendo llegado a alcanzar la identidad propia de los peces (espina dorsal, mecanismos de natación, buena percepción, etc.) viven como auténticos gusanos con medio cuerpo

introducido en un agujero del fondo marino (en el que desaparecen del todo ante cualquier amenaza) meciéndose suavemente al son de la corriente que le lleva las partículas alimenticias directamente a la boca. Por la misma razón una forma viva puede persistir sin grandes cambios por millones de años como en **el concepto tiburón**. Creo que en toda esta discusión se pueden encontrar argumentos para poder afirmar que la complejidad creciente es, en efecto y tal como se observa, uno de los resultados posibles ¡incluso necesario! de la evolución, aunque no un potencial de la misma claro. Si hay algún potencial de la evolución ése es sin duda la incertidumbre del entorno.

Pero sigamos porque aún queda otro camino para construir un estado estacionario nuevo. Y es cuando dos o más estados estacionarios se integran en uno solo. Es cuando dos individuos se asocian, más o menos definitivamente, para crear un nuevo estado estacionario. Es la asociación. Existen dos grandes modos para generar asociaciones viables: entre individuos similares -digamos en sentido amplio: sociedad- y entre individuos distintos -digamos en sentido literal: simbiosis. El primer caso abarca desde el concepto de familia hasta el de sociedad propiamente dicha, pasando por el de mero agregado, conjunto gregario o tipo manada. Se trata de una situación fundamentalísima que explica cómo los individuos escalan los niveles jerárquicos de la organización de la materia viva. La idea es clara en nuestro contexto:

El individuo sacrifica algo de su identidad individual a cambio de ganar algo de independencia respecto de la incertidumbre de su entorno.

El sentido de la selección natural también adquiere ahora una luz especial:

El individuo aumenta su dependencia con otros individuos similares y se integra en un conjunto que es viable si es menos dependiente de la incertidumbre del entorno, de lo que lo son los individuos por separado.

Un ñu solitario depende más de las inclemencias del entorno que un ñu en manada. Los pingüinos regulan mejor las fluctuaciones de temperatura gregariamente ... La identidad de un individuo construido por asociación puede ser tan fuerte que su nueva unidad se hace irreversible. Eso es sin duda lo que ocurre con los insectos sociales. La colonia de hormigas es, sin la menor duda, un individuo vivo más independiente de la incertidumbre del entorno (¡y más complejo!) que cualquiera de sus miembros (es más que la mera suma de complejidades). El tema adquiere aquí matices apasionantes ¿Cómo fue el tránsito hacia los primeros metazoos? Durante miles de millones de años sólo hubo bacterias cuya independencia fue transformando el entorno. No sabemos cómo, pero hace unos cientos de millones de años, el método de crear nuevos estados estacionarios por asociación dio sus primeros frutos. Hoy sabemos que, en condiciones desfavorables del entorno, muchas bacterias se agregan [10, 11] estableciendo entre ellas incluso vínculos mecánicos, lo que confiere al conjunto una textura de fina y consistente película. Reaparece la misma idea: el aumento de la incertidumbre del entorno es la presión que anima la escalada a través de las sucesivas estructuras jerárquicas.

La otra manera de crear un estado estacionario termodinámico nuevo es con la integración de dos o más individuos diferentes. Es la simbiosis un hermoso fenómeno que ha dado lugar a elegantes propuestas sobre la evolución de las especies [12]. La idea se lee aquí, en esencia, como en el caso anterior de la asociación:

El resultado de la simbiosis es más independiente respecto de la incertidumbre del entorno, que cualquiera de los simbioses por separado.

Además, la simbiosis no es en general una mera yuxtaposición de estados estacionarios. Entre los elementos que pactan una simbiosis suele haber una interacción no nula, lo que genera un nuevo individuo cuya independencia es incluso mayor que la de la suma de sus partes. Las ilustraciones son sencillamente inagotables. Digamos sólo que una célula que come bien y se mueve mal se puede aliar íntimamente con otra que come mal pero que se mueve bien, para inventar una nueva célula nueva mucho más independiente de la incertidumbre del medio que cualquiera de las dos firmantes del pacto. Margulis ha mostrado la potencia generadora de la simbiosis en microorganismos y nadie duda que tal cosa se extienda con enorme insistencia en todos los sentidos de la organización biológica. Digamos de nuevo que la presión de la incertidumbre del entorno sería el gran estímulo para el establecimiento de pactos simbióticos.

4. Forma versus Función

Las dos tablas conceptuales (1 y 2) constituyen en realidad todo un programa de investigación (y revisión) de cualquier área del conjunto de las soluciones vivas observables. Tratemos de ilustrar algún caso. En la tabla 1 escojamos por ejemplo Inteligibilidad y Forma, la combinación que tanto fascinara a mi admirado D'Arcy Thomson.

En la naturaleza, ciertas formas vivas aparecen con más frecuencia que otras. Desde Plinio, algunas se han observado curiosamente ubicuas: círculos, segmentos, parábolas, hexágonos, espirales, hélices, ángulo, ondas, fractales, ... La cuestión es aproximarse a la inteligibilidad de estas formas. Empecemos por decir que la inteligibilidad en ciencia, en el sentido amplio, se entiende como la esencia de las cosas. Aquello que es común en casos aparentemente diferentes. La inteligibilidad (la comprensión) es siempre un modo de reducir (la compresión). ¿Sabemos siquiera lo que deseáramos saber? Creo que sí. Lo que deseáramos es que hay de común entre las mismas formas con diferentes soportes. Un mineral como la pirolusita, el fondo de la retina de un ojo y un arbusto son objetos poco sospechosos de estar ligados por algún tipo de parentesco, pero ¿existe algo común que explique sus respectivas formas fractales? Esta clase de inteligibilidad tiene mucho que ver con la que hemos adelantado al principio.

Como hemos mencionado al principio, la inteligibilidad de un individuo vivo, o de alguna de sus partes, tiene dos vertientes bien distintas: la necesidad y la función. Entendemos por la primera el conjunto de todo aquello que favorece su probabilidad de emergencia (perdón por la inevitable redundancia) independientemente de la independencia de la incertidumbre del entorno. En el último lenguaje metafórico de Richard Dawkins [13], serían las montañas independientemente de que alguien las escale y de cómo lo haga. Hay pensadores modernos de la biología que cargan sobre este concepto parcial casi todo el peso de la inteligibilidad de la evolución biológica. Muchas formas, como se esfuerza en demostrar por ejemplo Brian Goodwin [14], emergen como consecuencia directa de la no linealidad de ciertas dinámicas. Es verdad. Emergen por ésta y otras mil razones fisicoquímicas del medio, algunas más sencillas y otras más complejas. Vale, pero ¿por qué se consagran? Su probabilidad de emergencia está muy lejos de coincidir con su probabilidad de presencia en la naturaleza. Falta,

naturalmente, la otra mitad de la inteligibilidad. La llamamos función y, en nuestro esquema conceptual significa otra probabilidad, la de superar la prueba de la independencia de la incertidumbre del entorno vía selección natural. Faltan los logros de escalar la montaña Dawkiana.

Comentemos algo, aunque sea poco, de necesidades y de funciones empezando por las situaciones más simples. Supongamos el entorno más simple posible: el vacío absoluto. No hay partículas de materia, ni cargas, ni campos de ningún tipo de fuerzas, no hay nada. El espacio es perfectamente homogéneo (igual en todas partes) e isótropo (igual en todas direcciones). En ausencia de mayor información ¿qué formas tienen mayor probabilidad de emergencia? La respuesta es clara (aquí se sonreiría Platón): la esfera, la circunferencia, el círculo. En el espacio de los astros, la esfera predomina con escandalosa superioridad. Sobre la superficie del planeta, donde estamos muy lejos del vacío, este efecto se nota aún con fuerza. Redonda es la Tierra, redondo es el Sol, redonda es la Luna, redondo es el Arco Iris, redonda es la trayectoria de cualquier cuerpo celeste durante la noche. Se pueden hacer muchos experimentos para fabricar redondeces. Los perdigones de caza, por ejemplo, se fabrican soltando una lluvia de gotitas de plomo líquido ¡en el vacío! Pero la Tierra es un cuerpo cuasi esférico con dos fuertes tropismos, la fuerza de la gravedad que pasa por el centro del planeta (rigurosa vertical) y la luz del Sol que depende sobre todo de la posición de éste. Para los individuos vivos que se salvan de estas desviaciones de la perfección esférica, como los anclados en las profundidades marinas, la esfera, además de necesaria, puede convertirse incluso en funcional. ¡No es fácil morder una esfera para bocas de cierta apertura! Si el individuo no está anclado, pero tiene vejiga natatoria (burla la gravedad), entonces la natación se facilita con formas más elipsoidales. La esfera se deforma por filtro aerodinámico. Si el individuo está anclado fuera del agua y crece por presión selectiva, la esfera se deforma en cilindro vertical (el árbol) y si hilamos un poco más fino y consideramos el efecto pandeo, el cilindro se sustituye por una forma ligeramente troncocónica. Las hojas se encargan de recoger la luz y ciertos materiales, las raíces sobre todo agua y nutrientes. Hablamos ahora de partes funcionales de un individuo vivo. Consideremos una “parte intermedia” formada por ramas y hojas: la copa entera. Un árbol en un entorno con luz suficiente e isótropa (en una buena latitud y sin competencia de otros vecinos) puede resistir con una forma esférica. Pero un árbol en una selva tropical o en un bosque alpino derivarán a otras formas, el primero hacia una forma de simetría circular tipo “boina” (el sol pasa por la vertical) y el segundo hacia otra de simetría circular tipo “cono” (el sol se pega más al horizonte: la coníferas). Consideremos la estructura más en detalle: las ramas de la copa o las raíces. Ahora se trata de acceder íntimamente a los puntos del espacio para captar materiales. Sorpresa: ¡Ahora no queda ni rastro de la simetría esférica! ¿Qué tiene que ver la ramificación con una circunferencia? Nada en absoluto. Las ramificaciones y muchas otras formas fractales son hiperfrecuentes en la naturaleza (Ramas, raíces, sistema circulatorio, sistema nervioso, ...). En este caso la función está muy clara. Probablemente es la mejor manera de acceder con continuidad e intimidad el espacio, la mejor manera de rellenarlo, la manera más fina y controlada de visitar o de aproximarse a cualquier punto del espacio. En este caso pues está muy clara la función, pero muy oscura la necesidad. En otras palabras: Las formas fractales serían bienvenidas funcionalmente por la selección natural, pero primero han de estar ahí ¿Cómo se explica su emergencia? Su emergencia se explica, pero no es tan intuitiva como el círculo. De hecho, no es nada intuitiva. Requiere ciertos conceptos y operaciones complejos de matemática estadística, hace poco que se han publicado [15, 16] y han supuesto varios años de

reflexiones y emociones compartidas con mi amigo y entonces doctorando Romualdo Pastor. No se trata de abrir aquí un desmesurado paréntesis para seguir los detalles de la demostración. Baste el siguiente comentario: de entre las configuraciones matemáticas posibles que se pueden generar por iteración, el número que representan formas fractales es lo bastante alto como para que su emergencia sea altamente probable. Emociona encontrarse con alguna obra místicoartística de la antigüedad, en la que se aprecia (sobre todo si uno está predispuesto a ello) que, de todos modos, alguien ha intuido la relación entre los círculos, los fractales y la “creación del mundo”.

Todo está preparado para un pequeño ejercicio final. No se trata de un estudio riguroso, intenso, ni extenso, sino de un apunte que tiene el mérito de mostrar las posibilidades de un nuevo esquema conceptual. Los elementos a utilizar son tres:

- 1) Las formas más frecuentes observadas en los individuos vivos o en alguna de sus partes funcionales en su versión matemática más simple.
- 2) La inteligibilidad que se deriva del esquema conceptual. En particular, interesan la necesidad (tipo circular, fractal, caótica, etc.) que impone directamente las condiciones del entorno y la función que filtra la selección natural indirectamente a través de la incertidumbre del entorno.
- 3) Pequeña profusión de ejemplos de la realidad que ilustre la relación forma versus inteligibilidad.

El resultado de este ejercicio son nueve formas simples para dibujar la complejidad biológica. La probabilidad de emergencia de las ocho primeras se apoya en la simetría circular más o menos distorsionada, la de la novena en la propia fractalidad. La probabilidad de selección se apoya en las funciones, es decir, en toda la discusión que precede sobre la tendencia a la independencia del individuo respecto de la incertidumbre de su entorno.

1. Círculo (Generar, rodar, defender, mínima disipación)

Es la máxima simetría, la máxima isotropía. La isotropía es especialmente operativa en innumerables casos tanto para disipar como para captar. También para defender (se vigilan todas las direcciones y una esfera es particularmente difícil de morder para todas las bocas menores que cierta medida).

El círculo es el menor perímetro que encierra la máxima superficie (interés defensivo) y la superficie esférica la menor que encierra un volumen determinado. El interés no es sólo defensivo. La simetría esférica es también idónea a la hora de minimizar la velocidad de intercambio de materia y energía. Una fuerte convergencia en el desierto: los cactus reducen la superficie de las hojas hasta convertirlas en espinas, pero muchos adoptan, además, la forma esférica. La idea consiste en dificultar todo lo posible la pérdida de agua. Sin embargo, en las pocas ocasiones en las que hay humedad, el problema se invierte e interesa que la forma de la superficie facilite el ingreso de agua en el volumen que aquella encierra. La situación parece resolverse con un pacto esquizofrénico: una esfera formada por estrías tipo el “radiador de la calefacción”.

El movimiento de una simetría circular sobre casi cualquier otra forma ofrece un óptimo contacto en muchos sentidos, todos ellos favorecedores de la independencia. De esta propiedad depende un efecto tan notable en física como el “rodar sin deslizarse”. La rotación, además, engendra las superficies y volúmenes de revolución (tipo alfarero) omnipresentes en todos los reinos de la materia viva.

Lo difícil es encontrar un individuo vivo en el que no se puedan encontrar circunferencias, círculos o esferas.

2. El segmento (situar, conectar, aguantar, desplazar, proporcionar)

El segmento, en especial el segmento doble, la porción recta de ida y vuelta, tiene una función clara: medir la distancia más corta de una posible presa o de un posible depredador. Conecta el individuo con su futuro inmediato, con el comer y no ser comido. El desplazamiento más probable (empezando por el propio movimiento browniano) es el tramo recto, incluso para engañar, cuando se amaga una dirección que cambia bruscamente en el último momento. Con el segmento se miden las distancias y las proporciones, proporciones de una escala a otra, proporciones de orden estético como las determinadas por las célebres reglas áureas. La distancia entre el centro de los ojos o el de los oídos juega un papel decisivo en cuanto a la precisión de estas medidas. El segmento es también un elemento estructural básico.

3. El ángulo (penetrar, apuntar, pinchar, cortar, reunir)

El ángulo, en el sentido amplio (el vértice de un cono, la intersección de dos segmentos, ...) consigue, básicamente, la máxima concentración de todo aquello que se puede transmitir. Por ejemplo y sobre todo: fuerzas. Las fuerzas se transmiten a través de un cuerpo rígido hacia la punta, de modo que sobre una superficie nula en el límite (la punta ideal, el filo ideal), la presión se hace infinita. La selección actúa sobre esta forma para dar espinas, dientes, contornos aerodinámicos, ... Las convergencias son espectaculares. Hay espinas vegetales que derivan de hojas (son hojas) y hay espinas que son meras deformaciones de la superficie frontera (como tantas espinas de árboles). Los peces tienen dientes que son auténticos dientes, pero también tienen dientes que son meras deformaciones epidérmicas. Igual forma, diferente estructura. Su inteligibilidad tiene distinta necesidad e igual función. Atacar, defender, comer y no ser comido, ... tal es la relación con el mantenimiento de la incertidumbre del entorno. Basta abrir una caja de herramientas de cualquier tipo (lampista, carpintero, relojero o cirujano) para comprobar la gran profusión de ángulos de todo tipo, seleccionados para cumplir con gran diversidad de precisas funciones. La mano y su prolongación exosomática, la herramienta, significó sin duda el gran salto de la humanidad en su carrera por independizarse de la incertidumbre de su entorno.

4. La parábola (recibir, emitir, concentrar)

Es una cónica por lo que es una curva emparentada también con el círculo. Su propiedad más destacada es que concentra en un punto (el foco de la parábola) toda recta que, incidiendo paralela al eje, se refleja en la curva. Es idónea por lo tanto para optimizar la captación de todo lo que llega del infinito o para la emisión de todo lo que sale del foco. Los pabellones auriculares de los primeros y pequeños mamíferos

nocturnos consiguieron con ello una razonable independencia respecto de un entorno plagado de incertidumbres amenazadoras. El murciélago insectívoro basa su hiperpreciso e hipersensible sistema de percepción en un paraboloide desde cuyo foco se emiten y reciben los ultrasonidos. Y sobre todo: cualquier salto o lanzamiento en un campo gravitatorio es una parábola. En la tecnología humana, el concepto antena ha llenado muchos paisajes de parábolas.

5. El hexágono (pavimentar)

Su probabilidad de emergencia está ligada a la de una población de simetrías circulares tangentes. En efecto, cuando una profusión de círculos iguales (o equivalente: circunferencias, cilindros, esferas, ...) se disputan la ocupación del espacio, la tendencia es a la simetría hexagonal. Tales poblaciones circulares sí tienen una alta probabilidad de emergencia, por lo que sólo falta “aprovechar” los espacios vacíos intersticiales que quedan entre las seis tangencias, para que surja una pavimentación a base de hexágonos. Las celdas de una colmena o las facetas de los ojos de tantos invertebrados son originalmente cilindros. Sin embargo el empaquetamiento hexagonal ahorra cera o mejora la calidad de la imagen, dos pequeños impulsos a la independencia de la incertidumbre del entorno. Se puede hacer un sencillito experimento para visualizar este fenómeno: se introducen globos esféricos idénticos en una caja que cierre herméticamente y se hace el vacío. La materia inerte y la materia viva exhiben un auténtico festival de presencias hexagonales. He aquí una lista a bote pronto: la convección de Bénard, las estructuras de tantas formaciones geológicas (como las columnas de basalto), los ojos facetados, la piel y caparazón de tantos animales, los esqueletos de Rodolarias, las alas de tantos insectos, las superficies de tantos vegetales, las almohadillas adherentes de tantas ranitas, etc .

6. La espiral (empaquetar, crecer ahorrando espacio)

La espiral es otra de las formas omnipresentes en la naturaleza. Su probabilidad de emergencia descansa en una circunferencia que emigra sobre su propio plano. Las espirales emergen en la materia tanto en escenarios pequeños (la reacción química de Belousov- Zhabotinskii) como en escenarios colosales (las galaxias). La selección natural tiene sobre qué trabajar. En efecto, la combinación de ser grande, pesado o largo, por un lado, y no derrochar el espacio por el otro, supone una buena receta a favor de la independencia del entorno. Por ejemplo: los cuernos. Conviene que sean grandes para desanimar a enemigos y adversarios, pero conviene también que no se enreden con la maleza durante una huida comprometida. Solución: enrollarse sobre sí mismos. A veces interesa simplemente proteger un cuerpo de la incertidumbre del entorno, un cuerpo que crece en masa pero no tanto en volumen, la idea de tantos caracoles y similares. Otras veces se trata sólo de una parte del cuerpo cuya función contra la incertidumbre es sólo temporal (a veces incluso en momentos muy precisos) como la cola del mono, del caballito de mar o del camaleón, o la trompa de una mariposa. También es imposible pasearse por un bosque o por un jardín botánico y no ver espirales en miles de situaciones diferentes. La disposición de pétalos, hojas y semillas se espiralizan con impresionante frecuencia, pero el caso más espectacular es quizá el de algunos helechos que esperan empaquetados en espirales de espirales, el momento apropiado para desplegarse en su versión definitiva. En la cultura humana la espiral se repite inquietantemente desde el neolítico hasta hoy mismo en un sinfín de símbolos de todo tipo. El caballito de mar o hipocampo difieren de ciertos parientes no muy lejanos,

como el pez trompeta, justamente por su tendencia a espirilizar su forma, una situación fuertemente convergente con la relación entre amonites y ortoceras, con la de los cuernos de ciertos mamíferos, incluso con la de ciertos instrumentos de viento.

7. La hélice (amarrar, anclar, guardar)

La hélice no es menos frecuente en la naturaleza, desde un tornado a la concha de una ortocera. Su probabilidad de emergencia se basa en una circunferencia que emigra del plano que la contiene según una dirección perpendicular a éste. Pero su inteligibilidad se completa con una función muy clara que se explica con leyes físicas muy sencillas. Una cuerda de esparto enrollada en torno de un cilindro de hierro, por ejemplo, es una espiral. Pues bien la fuerza necesaria para liberar la cuerda tirando por un extremo crece ¡exponencialmente! con el número de vueltas que ésta da en torno del núcleo de hierro. Es la ley de Euler. Y con ella se calcula que con nueve kilogramos y sólo tres vueltas de cuerda se puede sostener un peso de ¡cinco toneladas! Las serpientes arbolícolas y muchos monos se agarran con firmeza gracias a este fenómeno. Los marineros también lo conocen bien: una par de vueltas al cabo en torno a un palo en la proa y el bote, con veinte arponeros, puede ser arrastrado por una ballena. Lianas enormes, pequeños zarcillos, el sistema de sujeción de algunos modelos históricos de sandalias o uno de los inventos más importantes de la humanidad, el tornillo, se basan en esta espectacular propiedad. Algunas funciones se emparejan con frecuencia: mientras no se usa, una forma se empaqueta en versión espiral y, a la hora de agarrar, es cuando se despliega en versión hélice (es el caso de la cola del mono o de la trompa de elefante). La hélice también sirve para alargarse sin alejarse demasiado. Por lo tanto también sirve, como la hélice, para empaquetar, pero sobre todo para guardar y, en especial, para guardar algo que luego haya que duplicar ágilmente. Es, nada más y nada menos, que el caso de la molécula encargada de preservar la identidad del individuo vivo a nivel de organismo.

8. La onda (mover, perturbar, difundir, comunicar)

La necesidad de esta forma en el mundo físico no necesita justificación. Cualquier perturbación en el seno de cualquier material se propaga en forma de onda. La relación de la onda más simple (sinusoidal por ejemplo) con la simetría circular no es menos evidente: basta proyectar sobre la dirección de un diámetro el movimiento de un punto que se mueve sobre una circunferencia que a su vez se traslada en el espacio. En otras palabras, la onda es la manera más simple de mover información sin desplazar materia (sonido, luz, ...), pero también la manera más simple de mover un cuerpo material de una complejidad no necesariamente alta (gusanos según ondas longitudinales, peces según ondas transversales laterales, mamíferos acuáticos según ondas transversales verticales, ...). El aspecto funcional de la inteligibilidad de una onda se observa a veces con mayor nitidez en el registro fósil. En efecto, no es fácil apreciar el movimiento sinusoidal observado la natación de un pez vivo. Sin embargo resulta emocionante constatarlo en una huella dejada en el fondo del mar hace cientos de millones de años. Cerca de la localidad leridana de Ager se ha encontrado un espléndido ejemplo.

9. Los fractales (rellenar, acceder íntimamente y con continuidad a los puntos del espacio)

La inteligibilidad de los fractales es bien singular, porque en este caso se comprende bien la función, pero no la necesidad. En otras palabras, se entiende bien que la selección natural favorezca una forma autosimilar que se propaga a escalas progresivamente pequeñas, interesando así íntimamente el espacio (el interior en el caso del sistema circulatorio y el nervioso o el exterior en el caso de las raíces y ramas). Sin embargo lo que no se entiende es porque hay tanto donde seleccionar. La emergencia necesaria de los fractales es sin duda menos intuitiva que la de otras formas emparentadas, más o menos cercanamente con el círculo. ¿Por qué son tan frecuentes los fractales? De hecho, hasta hace poco no se conocía ninguna justificación y la única que hoy conocemos, demasiado compleja para exponerla aquí, es el resultado de un teorema que tiene poco de inmediato [16]. La lista de fractales naturales llena hoy buena parte de la literatura científica ilustrada [17]: dendritas en minerales como la pirolusita, corrientes de agua, descargas eléctricas, copos de nieve, crecimiento de electrolitos, árboles, arbustos, pulmones, colonias bacterianas, esponjas, medusas, helechos, dibujos en las conchas de caracoles y caracolas, neuronas, ...

5. Referencias

1. Thomson, D'Arcy W., *On Growth and Form: A New Edition*, Cambridge University Press, 1942.
2. Glansdorff, P y I. Prigogine, *Structure, stabilité et fluctuations*, Masson, 1971.
3. Wagensberg, J. *La necesidad del azar*, Mundo Científico, 1, (32), 1981.
4. Wagensberg, J. *El azar creador*, Mundo Científico, 12, (316), 1982.
5. Lurié, D. y Wagensberg, J. *Nonequilibrium Thermodynamics and Biological Growth and Development*, Journal of Theoretical Biology, 78, (241), 1979.
6. Masoliver, J y Wagensberg, J., *Introducció a la teoria de la probabilitat i de la informació*, Edicions Proa, 1966.
7. Wagensberg, J. García, a. y Solé, R.V., *Energy Flow-Networks and the Maximum Entropy Formalism*, en Maximum Entropy and Bayesian Methods, ed. by W.T. Grandy, Kluwer Academic Publishers, 1991.
8. Gould, S. J. (1996). *Full House, the spread of excellence from Plato to Darwin*. Harmony Books, NY, (traducción española en ed. Crítica).
9. Wagensberg, J. en *El Progreso: ¿Un concepto acabado o emergente?*, Metatemas 52, Tusquets, eds, 1998.
10. Wagensberg, J. *A Coopetrative Effect with Significance in the Biological Evolution*, en Processes in Nonequilibrium Systems, Lectures Notes in Physics, 84 (350), Springer Verlag, 1978.

11. Wagensberg, J. (1982) ***Patterns in Nonequilibrium Organization***. En Selforganization and Dissipative Structures. The University of Texas Press **14** (239).
12. Margulis L. y D. Sagan, ***Microcosmos***. Metatemas 39, Tusquets eds., 1995.
13. Dawkins R. ***Escalando el Monte Improbable***, Metatemas 53, Tusquets eds. 1998.
14. Goodwin, B. ***Las Manchas del Leopardo***, Metatemas 51, Tusquets eds., 1998.
15. Pastor Satorras, R y J. Wagensberg, ***Branch distribution in diffusion-limited aggregation: a maximum entropy approach***, Physica A 224 (463-479), 1996.
16. Pastor Satorras, R y J. Wagensberg, ***The maximum entropy principle and the nature of fractals***, Physica A 251 (291-302), 1998.
17. Mandelbrot, B. ***La Geometría Fractal de la Naturaleza***, Metatemas 49, Tusquets eds. 1998.