



Revista Colombiana de Filosofía de la Ciencia

ISSN: 0124-4620

ISSN: 2463-1159

revistafilosofiaciencia@unbosque.edu.co

Universidad El Bosque

Colombia

Recober Montilla, Adolfo

SOBRE EL ORDEN Y CÓMO SE GENERA*

Revista Colombiana de Filosofía de la Ciencia, vol. 21, núm. 42, 2021, Enero-Junio, pp. 99-148

Universidad El Bosque

Bogotá, Colombia

DOI: <https://doi.org/10.18270/rcfc.v21i42.3701>

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=41469137004>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica Redalyc

Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

SOBRE EL ORDEN Y CÓMO SE GENERA*

ON ORDER AND HOW IT IS GENERATED

ADOLFO RECOBER MONTILLA

Autor independiente

Tenero, Suiza

adolforecober@gmail.com



RESUMEN

Con autoorganización u orden espontáneo, se alude a una multitud de procesos cuya comprensión supone un difícil desafío, y parte de esa dificultad reside en la precisión nocional de los conceptos fundamentales implicados. Mi objetivo inicial fue, únicamente, desarrollar una noción precisa del concepto orden. Sin embargo, desde la noción obtenida, parecía hacerse evidente un principio que gobierna de modo general su emergencia, y cuya exposición será aquí mi principal objetivo: que las interacciones entre relaciones ordenadas solo pueden producir relaciones ordenadas.

Palabras clave: orden; emergencia; evolución; complejidad; organización; funcionalidad.

ABSTRACT

With self-organization or spontaneous order, it refers to a multitude of processes whose understanding poses a difficult challenge, and part of this difficulty lies in the notional precision of the fundamental concepts involved. My initial objective was solely to develop a precise notion of the concept of order. However, from the notion obtained, it seemed to become evident a principle that governs the emergence of order in a general way, and whose exposition will be my main objective here: that the interactions between ordered relationships can only produce ordered relationships.

Keywords: order; emergence; evolution; complexity; organization; functionality.

1. INTRODUCCIÓN

Si bien el término *autoorganización* fue introducido por Kant en la *Crítica del juicio* (2013), la idea de un proceso evolutivo general, a través del cual la materia se ordena en estructuras progresivamente más complejas, puede encontrarse ya en Aristóteles e incluso en los antiguos atomistas. En *El fenómeno humano* (1967), aunque desde una perspectiva metafísica, Pierre Teilhard de Chardin manifiesta claramente esa convicción. Y la misma idea había sido ya postulada por Lamarck (2017) y, también con anterioridad, tratada por filósofos como Friedrich Schelling (1996), Georg Wilhelm Friedrich Hegel (2004) y, especialmente, Henri Bergson (2007), quien fue la fuente directa que inspiró a Teilhard. Actualmente y desde distintas perspectivas, investigadores como Luis Eugenio Andrade, en *La ontogenia del pensamiento evolutivo* (2011) o Stuart Alan Kaufmann (1993, 1995), animan a mantener vivos el debate y la inquietud por comprender estos fenómenos. Steven Henry Strogatz (2003), que investiga la sincronización en sistemas dinámicos, afirma:

Por razones que aún no entendemos, la sincronización es una de las tendencias más dominantes del universo, que se extiende desde los átomos a los animales, de las personas a los planetas ... Incluso las cosas sin vida pueden sincronizarse

... Todos los ejemplos son variaciones sobre el mismo tema matemático: la autoorganización, la emergencia espontánea del orden a partir del caos (Strogatz 2003 14).

Con la teoría general de sistemas, Ludwig von Bertalanffy (1976) propone contemplar las distintas estructuras, a las que denominará *sistemas*, desde una perspectiva interdisciplinaria que permita inferir las leyes generales que gobiernan su evolución.

En un ser vivo hay innumerables procesos químicos y físicos ordenados de tal manera que permiten al sistema vivo persistir, crecer, desarrollarse, reproducirse, etcétera. Pero, ¿qué significa esa noción de orden, que buscaríamos en vano en un texto de física? ... perduran cuestiones que no acostumbran ser planteadas ni contestadas en los textos de evolución (Bertalanffy 1976 144).

Con la teoría social del orden espontáneo, Friedrich von Hayek (1973, 1976, 1979) afirma que las relaciones sociales evolucionan por sí mismas, mostrando niveles de orden y organización que no podrían alcanzar mediante la intención consciente de los individuos. En su conferencia en Lindau (1983), expone:

He elegido tratar un asunto que, aunque surgió de mi estudio de los problemas económicos, me parece aplicable a un campo mucho más amplio; de hecho, en todas partes donde la creciente complejidad de los fenómenos con los cuales tenemos que lidiar, nos obliga a abandonar la esperanza de encontrar explicaciones simples de causa y efecto, y a sustituirlas por una explicación de la evolución de estructuras complejas. Me gusta hablar a este respecto del doble problema de la formación espontánea de órdenes y la evolución (Hayek 1983).

Ilya Prigogine e Isabelle Stengers proponen el concepto de *estructura disipativa* para designar a aquellas estructuras que, lejos del equilibrio termodinámico, tienen la propiedad de producir orden.

Sabemos hoy que la biosfera, como un todo, así como sus componentes, vivos o inertes, existe en condiciones lejanas al equilibrio. En este contexto la vida, lejos de estar fuera del orden natural, aparece como la expresión suprema de los procesos de autoorganización que ocurren (Prigogine & Stengers 1984 185).

Otros investigadores, como Octavio Miramontes, expresan de forma particularmente clara la idea de un proceso evolutivo general. “La evolución es una tendencia generalizada en la naturaleza. Desde el origen del Universo y su expansión inicial ... La vida no es sino una etapa más en la inevitable evolución de la materia” (Miramontes 2009 34).

Se trata, en la mayoría de los casos, de una idea inferida a partir de la observación de muy diversos fenómenos, pero no sustentada por la comprensión de una explicación causal: un *mecanismo evolutivo* responsable. Esta situación resulta notablemente similar a la que enfrentaba la evolución biológica hasta Darwin (1998), pues era ya entonces reconocida por muchos naturalistas a partir de evidencias como el registro fósil y las similitudes anatómicas entre organismos principalmente, pero se ignoraba su causa.

Dos cuestiones constituyen la dificultad principal en la resolución de esta problemática: el campo notablemente multidisciplinario en que estos fenómenos tienen lugar y la escasa precisión en la definición de los conceptos fundamentales: *evolución, orden, organización y complejidad*. De hecho, algunos autores hablan de evolución en un campo concreto, como Hayek (1973, 1976, 1979), que alude a las relaciones sociales, o Schleicher (1850), sobre la evolución lingüística. Otros, como Miramontes (2009), exponen claramente su convicción de la existencia de un proceso evolutivo general en su sentido más amplio.

Algo parecido ocurre con el término asignado a *lo que evoluciona*. Algunos autores hablan de estructuras; otros, como Prigogine¹ (1984), especifican estructuras

¹ La idea que discuto es de Prigogine, y de hecho solo Prigogine recibe el premio Nobel por ella. Sin embargo, en el libro *Order out of Chaos: Man's New Dialogue with Nature* (1984) en el que aparece expresada esta idea, Prigogine comparte la autoría con Stengers. Haré mención de Prigogine como autor, pero en las citas y referencias haré el reconocimiento de Stengers como coautor.

disipativas o, como Bertalanffy (1976), se refieren a *sistemas*, y unos cuantos más, como Teilhard (1967), no dan importancia al término, refiriéndose simplemente a materia ordenada u organizada. Respecto a la propiedad distintiva de aquello que evoluciona, algunos autores hablan de *orden*, otros de *organización*, unos más consideran sinónimos ambos términos y otros, como Strogatz (2003), se refieren a *sincronización*.

Esta vaguedad nocional y las diferencias entre las distintas propuestas no son en absoluto criticables, pues cada una puede funcionar aceptablemente de forma independiente. Así, la teoría social del orden espontáneo de Hayek (1973, 1976, 1979), por ejemplo, sería igualmente operativa, aunque en lugar de orden, Hayek hubiese elegido el término *organización* o *coordinación*. Sin embargo, si pretendemos comprender un proceso general que abarca estructuras en todos los niveles, es necesario elegir términos que puedan aplicarse de manera general y, por supuesto, intentar definirlos. Y si lo que buscamos es el mecanismo evolutivo de un proceso que genera orden progresivamente más complejo, debemos comenzar por analizar, precisamente, los conceptos evolución, orden y complejidad. Sin embargo, aunque este trabajo está motivado por tales inquietudes, no se profundizará en los conceptos *evolución* o *complejidad*. La razón para dejar al margen estas cuestiones es el convencimiento de que, aunque sin duda son importantes, su tratamiento implicaría la consideración de una extensa cadena de argumentos cuyo abordaje solo estaría justificado a partir de una noción elemental del concepto *orden* y, con base en esa noción, de un análisis de los casos más simples de su emergencia. De hecho, todas las razones que me llevan a compartir con los autores citados la convicción de una tendencia general hacia el incremento de la complejidad del orden quedarían invalidadas si lo que aquí se expondrá fuese refutado por argumentos que no he sabido ver.

Así, en la siguiente sección se revisarán las principales acepciones del concepto *orden*, partiendo de su interpretación más intuitiva y analizando, a continuación, nociones propuestas por otros autores. Esta concluirá con la exposición de una noción que según creo permite identificar con precisión las relaciones ordenadas en las diversas estructuras. En la tercera sección, y con base en esa noción de *orden*, se describirá el principio que parece hacerse evidente al analizar diversos procesos de generación de patrones ordenados y que es, probablemente, el que gobierna de modo más general su emergencia. Por último, en la cuarta, se esbozarán las razones por las

que lo expuesto en las secciones anteriores podría constituir una base importante para la explicación causal del proceso evolutivo general: que el proceso de generación del orden constituye el componente principal de un mecanismo evolutivo, que la organización es una relación ordenada y que existe una tendencia al incremento de la complejidad.

2. ORDEN

El término orden es recurrente en distintas disciplinas científicas, está presente en la filosofía y refiere un concepto con el que estamos familiarizados también en la cotidianidad. Así, ante ciertos elementos, no tendríamos duda en afirmar intuitivamente cuáles son ordenados y cuáles desordenados (*véase* figura 1).

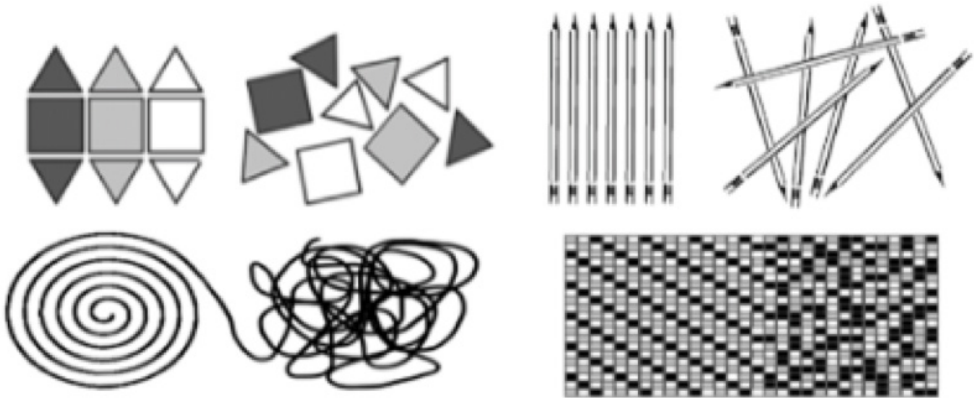


Figura 1. Algunas de las imágenes que vincularíamos a los conceptos orden y desorden.

Fuente: elaboración propia.

2.1 ORDEN COMO POSIBILIDAD DE DEDUCCIÓN DE UNA PARTE

Si bien aparentemente no entraña gran dificultad reconocer el orden, no resulta tan fácil encontrar una definición precisa de él. Una de las características que en primer lugar advertimos en lo que solemos reconocer como una estructura ordenada es que una parte de ella puede deducirse del resto de sus componentes. Así, si comparamos el diseño de un tablero de ajedrez con el garabato irregular dibujado por un niño, reconoceremos orden en el primero y desorden en el segundo, comprobando que, al cubrir una parte del tablero, esta es fácilmente deducible de la información que percibimos en la zona visible, mientras que una parte cubierta en el diseño desordenado no puede deducirse a partir de la zona expuesta (*véase figura 2*).

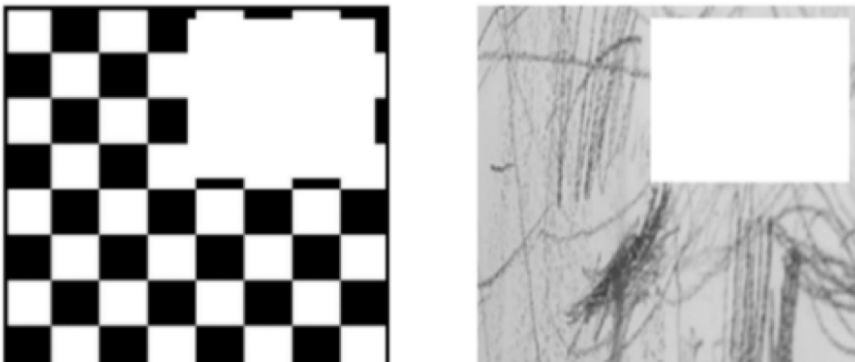


Figura 2. A partir de la zona visible, el orden de un tablero de ajedrez (izquierda) permite deducir una parte oculta; en un diseño desordenado (derecha), esta deducción no es posible.

Fuente: elaboración propia.

Como, en general, no responden a un patrón ordenado, la geometría de los continentes, la disposición de las estrellas que componen una constelación o los relieves de las cadenas montañosas tampoco permiten deducir con precisión una parte del conjunto (*véase figura 3*).

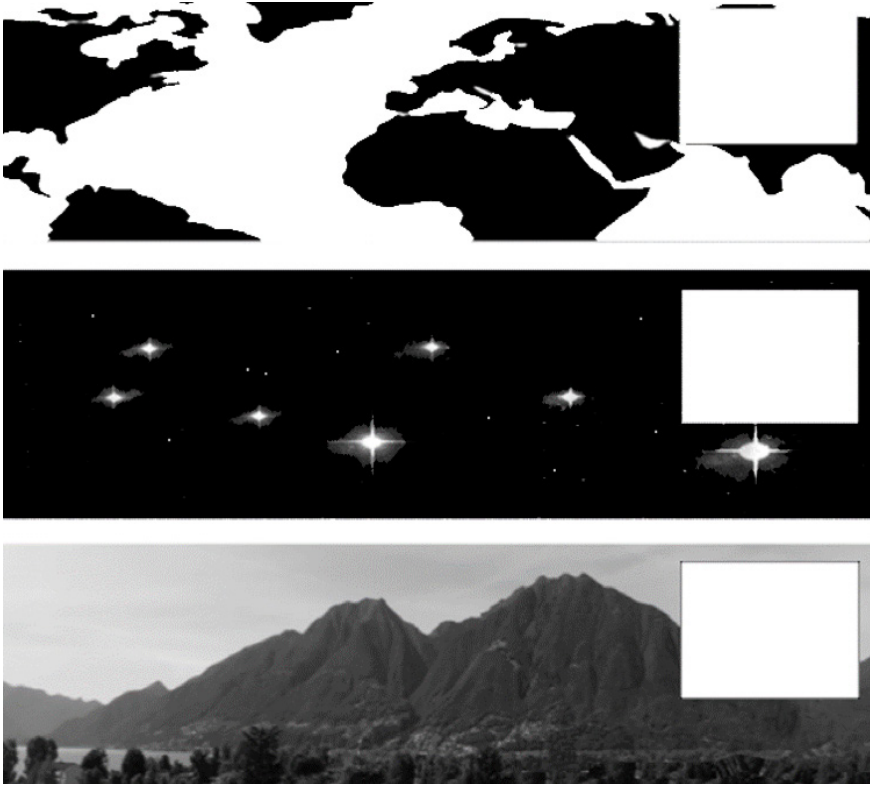


Figura 3. La irregularidad geométrica de los continentes, de las constelaciones o de las cadenas montañosas impide deducir una parte del todo.

Fuente: elaboración propia con base en fotografías propias.

Igualmente, podremos deducir una parte de un polígono regular, mientras no podremos hacer pronósticos semejantes en el caso de polígonos irregulares; o podremos calcular el componente de una sucesión ordenada o periódica (“1, 2, 3, 1, 2, 3, 1, x, 3...”), pero no podremos aplicar ningún cálculo útil en ese sentido, en el caso de una sucesión aperiódica (“9, 6, 3, 14, 7, 11, 7, x, 26...”).

Con base en esta particularidad, podríamos definir el orden como “la propiedad del objeto cuyas partes componentes son deducibles de la información perceptible en el resto de él”. En una línea similar de pensamiento, Hayek (1973) escribe:

Por orden, podríamos entender un estado de cosas en el cual una multitud de elementos de diverso género se hallan en tal relación unos con otros, que el conocimiento de alguna parte espacial o temporal del conjunto permite formular, acerca del resto, expectativas adecuadas o que, al menos, gocen de una elevada probabilidad de resultar ciertas (1973 36, *1er. tomo*).

2.2 ORDEN COMO POSIBILIDAD DE REDUCCIÓN DESCRIPTIVA

Existe un segundo modo de interpretar el orden, quizá algo más complejo, pero también aparentemente efectivo, y también con base en la información, concretamente en la *complejidad descriptiva* (Li & Vitányi 2009), desde el que podría definirse como “la propiedad del objeto cuya descripción puede reducirse algorítmicamente”. Desde este enfoque, como la descripción de la sucesión “2, 2, 2, 2, 2, 2, 2”, por ejemplo, puede reducirse a “7 veces 2”, esta sería ordenada; mientras que la sucesión “3, 5, 4, 8, 101, 24, 7”, al no poder expresarse más que describiendo cada uno de sus componentes y su posición, no lo sería. Del mismo modo, los polígonos regulares pueden describirse con precisión mediante un número reducido de recursos, mientras que los irregulares pueden requerir la descripción precisa de cada componente.

2.3 ORDEN COMO ITERACIÓN

Las dos nociones anteriores presentan varios problemas, principalmente derivados de que el orden no se asume como una propiedad del objeto, sino como una percepción del observador. Sin embargo, existe un modo de describir el orden que evita la problemática de las dos interpretaciones expuestas: “la presencia de una característica común en los componentes de un objeto”; es decir, iteración. De hecho, si analizamos el proceso que permite a un observador percibir orden desde las perspectivas expuestas, comprobamos que consiste en reconocer una relación entre las partes del objeto: una característica común, presente en todos sus componentes. Vemos que

tanto en el tablero de ajedrez, como en los polígonos o poliedros regulares, en las sucesiones periódicas, etcétera, los componentes de cada estructura comparten características comunes. En algunos casos, como en un polígono regular o en la sucesión “1, 2, 3, 1, 2, 3, 1, 2, 3...”, existe una reiteración de elementos, grupos de elementos o tramos. En otros casos, como el de la sucesión “1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9...”, aunque no se repiten los números, se repite la fórmula que los relaciona (cada número, es igual al anterior más 1), de modo que encontramos, de nuevo, una particularidad presente en todos los componentes.

Observamos también que tanto la posibilidad de *deducir una parte del resto*, como la de *comprimir la descripción* de un objeto son consecuencias de que este presenta iteraciones. La noción de orden, como existencia de características compartidas por todos los componentes, no requiere la presencia de un observador, sino que, desde esta acepción, se hace evidente que *el orden* es una propiedad del objeto. De hecho, una relación ordenada puede, por su complejidad, no ser evidente a la observación. Prueba de ello son los test de matrices progresivas (Raven 2003) que se basan, precisamente, en los límites de nuestra capacidad para percibir patrones (véase figura 4).

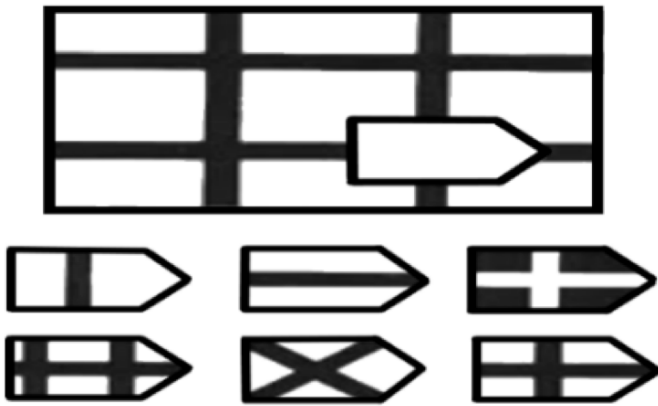


Figura 4. El reconocimiento de un patrón nos permite deducir una parte del todo.

Fuente: elaboración propia, inspirada en los tests de matrices progresivas de Raven (2003).

2.4 LA ELECCIÓN DEL TÉRMINO ORDEN

Parece, por tanto, más apropiado afirmar que el orden es precisamente esta relación, no siempre evidente a la observación, entre las partes o componentes de una estructura: la *iteración* de alguna característica. A continuación, se expondrán algunos de los motivos que invitan a elegir el término orden para denominar a esta propiedad, partiendo de su acepción más intuitiva.

Si tomamos tres sucesiones como “1, 2, 3, 4, 5, 6, 7...”, “2, 4, 2, 4, 2, 4, 2...” y “3, 3, 3, 3, 3, 3, 3...”, y nos preguntamos cómo llamaríamos a la propiedad que las distingue de la sucesión “4, 2, 2, 1, 7, 4, 9...”, probablemente la respuesta sería *orden* o *periodicidad*. Quizá también repetición o iteración ya que, como se ha dicho, aunque en la primera sucesión los números no se repiten, se repite la fórmula que los relaciona. Para polígonos y poliedros, la geometría establece un término también aplicable a fenómenos cíclicos como las mareas o las estaciones: *regularidad*. Cuando pensamos en la relación entre las propiedades de los elementos químicos y sus posiciones en la tabla periódica, podríamos considerar de nuevo el término periodicidad. Y en un sistema dinámico, como los planetarios, pensaríamos probablemente en coordinación o sincronización. El número de estos términos puede incluso aumentar, llevándonos a preguntarnos si sería más adecuado hablar de *orden*, *organización*, *regularidad*, *periodicidad*, *ciclicidad*, *iteración*, *sincronía*, *coordinación* o, hasta qué punto, todos ellos no serían sinónimos. En cualquier caso, esta propiedad a la que, por parecer más intuitivamente representativa, en adelante llamaremos orden, hace referencia a una relación entre componentes: la presencia de una misma característica en todos ellos; una propiedad que puede darse tanto en las relaciones estrictamente geométricas de estructuras físicas, como en procesos espacio-temporales (sistemas dinámicos) u objetos abstractos (sucesiones numéricas, figuras geométricas), etcétera.

2.5 RELACIONES ORDENADAS

Puede parecer que este criterio permite identificar con precisión a cualquier estructura como *ordenada* o *desordenada*. Sin embargo, apenas se reflexiona sobre esta posibilidad, se hace evidente que las estructuras, en realidad, no son ordenadas ni desordenadas, sino que presentan distintas relaciones entre sus componentes, y son esas relaciones las que podrán ser ordenadas o desordenadas.

Si definimos el *orden* como “la propiedad del objeto cuyas partes presentan alguna característica en común”, la sucesión “4, 2, 2, 1, 7, 4, 9, 6, 3” no debería, aparentemente, considerarse una estructura ordenada. Sin embargo, sus componentes sí que presentan características en común, ya que son todos números, están escritos en color negro, tienen el mismo tamaño, etcétera. En dicha sucesión, por tanto, existe orden, a pesar de no estar vinculado a relaciones matemáticas, sino a otras características (naturaleza, color, tamaño, entre otras). Igualmente, los componentes de un polígono, regular o no, tienen en común ser segmentos y ángulos; cualquier mineral, cristalizado con regularidad geométrica o geoméricamente irregular, estará constituido por átomos, por ejemplo.

Así, si construimos una sucesión con números elegidos aleatoriamente, podremos obtener desorden en la relación de valor de sus componentes (“4, 2, 2, 1, 7, 4, 9, 6, 3”); si damos a los distintos números un tamaño diferente, que no responda a ningún orden, tendremos desorden también en la relación de tamaño (“4, 2, 2, 1, 7, 4, 9, 6, 3”); si sustituimos algunos de los números por letras u otros símbolos, tendremos desorden, además, en cuanto a la naturaleza de los componentes (“X, 2, L, 1, +, 4, r, m, %”); dando un color distinto a cada componente, podríamos eliminar también el orden en esa relación de color; etcétera. Son, por tanto, las relaciones entre los componentes de una estructura, y no las estructuras, las que pueden ser ordenadas o desordenadas, y serán siempre una cosa o la otra: ordenadas, cuando refieran una característica presente en todos los componentes, y desordenadas cuando no sea así. Esta noción de orden, la presencia de una característica común en todos los elementos de una estructura, permite reconocer objetivamente las relaciones ordenadas y, así, analizar distintos casos de su emergencia, a partir de los que inferir principios

o leyes como el que se expondrá a continuación y que constituirá el núcleo de esta propuesta.

3. PROCESO DE GENERACIÓN

Esta sección consistirá en la exposición de una variedad de observaciones que evidencian, en mi opinión, un principio muy simple: que el orden solo puede producir orden y que solo la inclusión de desorden en un proceso permitirá que el resultado presente desorden.

3.1 OBSERVACIONES

3.1.1 FIGURAS DE CHLADNI

Encontramos uno de los muchos ejemplos ilustrativos de emergencia de orden en *las figuras de Chladni*. El físico Ernst Florenz Friedrich Chladni (1787) realizó un experimento que consistía en hacer vibrar una placa metálica, sobre la que había derramado arena. Al deslizar un arco de violín sobre uno de sus bordes, el granulado se distribuía produciendo distintos patrones ordenados, según la frecuencia de vibración (véase figura 5). Este fenómeno fue analizado posteriormente en mayor profundidad por Hans Jenny, quien acuñó el término *cimática* (2001) para designar el estudio del efecto periódico de las vibraciones sobre distintas sustancias y estructuras.

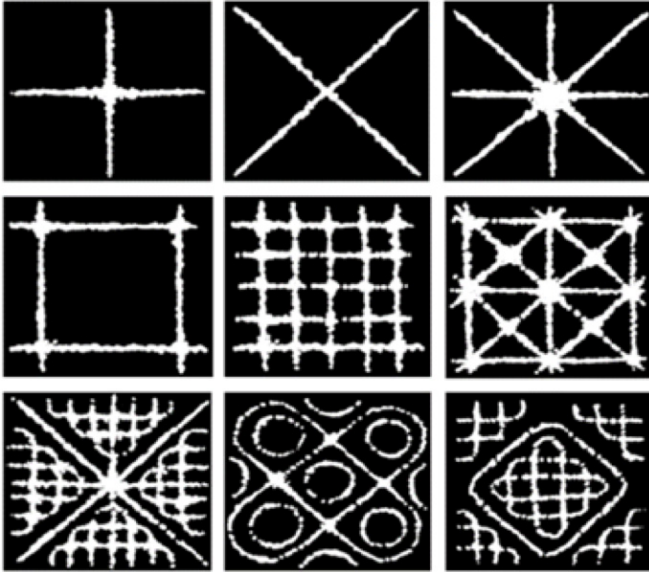


Figura 5. Patrones de distribución de un granulado sobre una placa cuadrada sometida a vibración a distintas frecuencias.

Fuente: elaboración propia con base en los experimentos de Chladni (1787).

El hecho sobre el que quiero llamar la atención es que, para que el patrón de distribución de la arena sea regular, deben serlo también la geometría de la placa, la frecuencia de vibración y el calibre del granulado. Así, por ejemplo, si la placa es triangular, circular o hexagonal, seguirán apareciendo patrones ordenados mientras que, si su forma es irregular, el patrón resultante será desordenado.

3.1.2 SUPERPOSICIÓN DE ENTRAMADOS

Otro proceso de emergencia de relaciones ordenadas que permite realizar experimentos aún más sencillos es la superposición de entramados. La zona de superposición presentará un patrón ordenado siempre que sean también regulares las retículas superpuestas (véase figura 6).

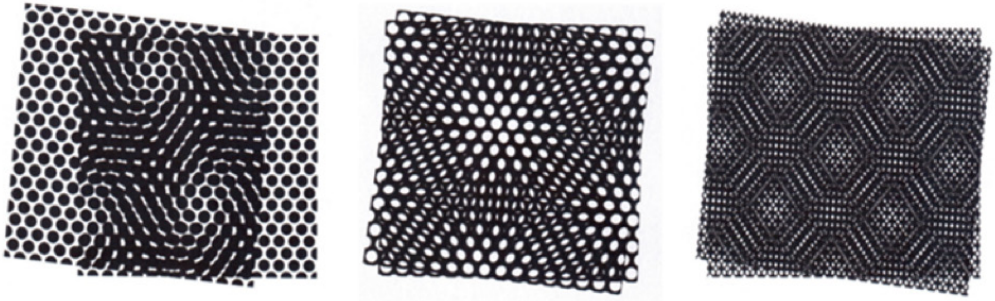


Figura 6. Superposición de distintos entramados regulares.

Fuente: elaboración propia.

Este fenómeno puede someterse fácilmente a experimentación con retículas, rejillas o entramados de distinto tipo, lo cual permite comprobar que, siempre que estos sean regulares, se producirán patrones ordenados (véase figura 7).

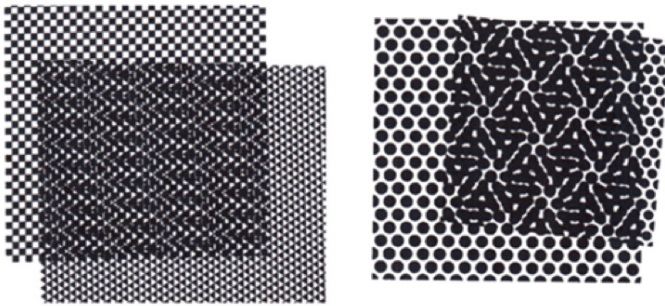


Figura 7. Superposición de dos rejillas distintas, constituidas por cuadrados y triángulos respectivamente (izquierda); y de dos rejillas compuestas por círculos, pero de distinto tamaño (derecha).

Fuente: elaboración propia.

Cuando este experimento se realiza manualmente, puede comprobarse que al desplazar o girar una rejilla sobre la otra, se observa una evolución de los motivos. Aunque estos cambian progresivamente su forma o tamaño, configuran siempre un patrón ordenado en la zona de superposición, en cualquier momento durante el desplazamiento o rotación (véanse figuras 8 y 9).

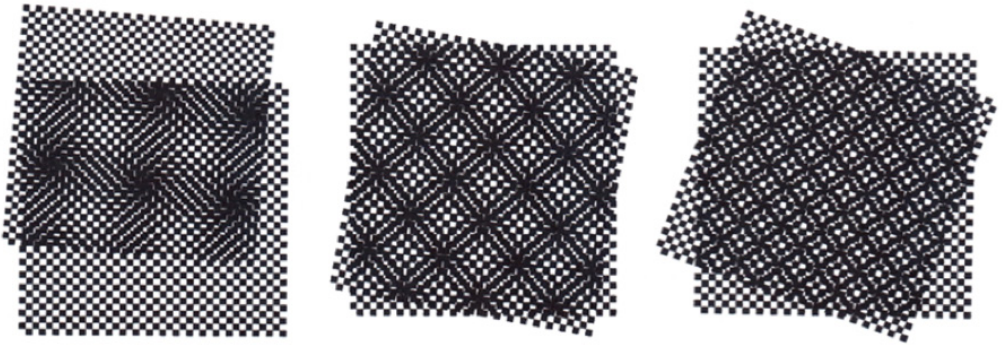


Figura 8. Rotación de una plantilla formada por cuadrados 5, 10 y 20 grados, respectivamente, sobre otra plantilla igual fija.

Fuente: elaboración propia.

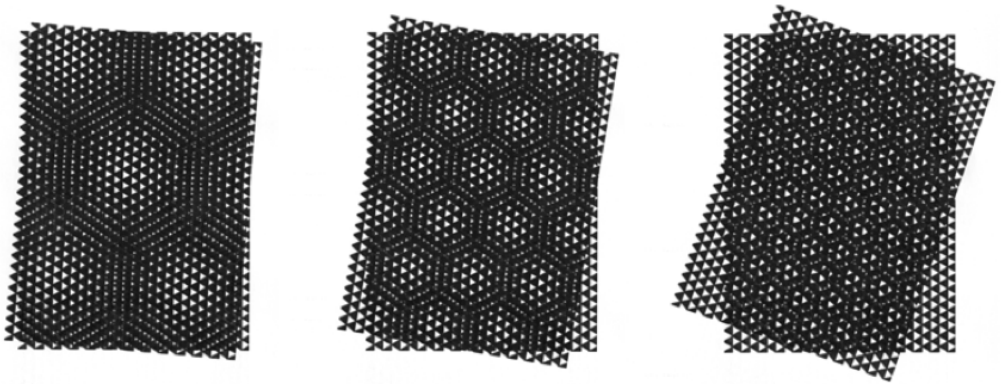


Figura 9. Rotación de una plantilla formada por triángulos 10, 15 y 20 grados, respectivamente, sobre otra plantilla igual fija.

Fuente: elaboración propia.

De nuevo, la emergencia de una estructura con relaciones ordenadas es consecuencia de la interacción entre estructuras con relaciones ordenadas. Además, solo si alguna de las estructuras implicadas en la interacción presenta algún desorden o irregularidad, la estructura resultante podrá presentar irregularidades.

3.1.3 TURBULENCIAS

En el marco de la dinámica de fluidos, se llama régimen de flujo laminar al desplazamiento en líneas de corriente más o menos paralelas, y régimen de flujo turbulento al desplazamiento en que estas líneas se entrecruzan en diversas direcciones. La viscosidad del fluido y la velocidad del flujo influyen en la generación de turbulencias de modo que, ante un obstáculo, una corriente puede pasar de laminar a turbulenta, por ejemplo, al aumentar su velocidad (véase figura 10).

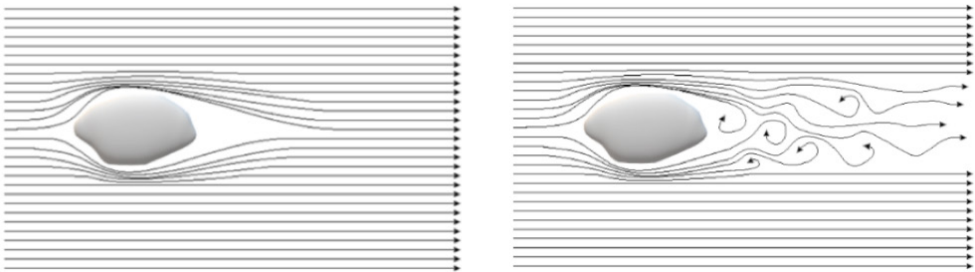


Figura 10. Representación de flujo laminar sobre un cuerpo sumergido (izquierda) y turbulencias debidas a un aumento de la velocidad del flujo (derecha).

Fuente: elaboración propia.

Sin embargo, un flujo turbulento no tiene por qué ser estrictamente desordenado, sino que puede generar vórtices y líneas de corriente con relaciones ordenadas complejas, dependiendo de las relaciones geométricas y dinámicas implicadas en el

proceso. Un ejemplo ilustrativo son las *calles de vórtices de Kármán*, descritas matemáticamente por Theodore von Kármán (1911), y que refieren la generación de patrones repetitivos en la dinámica del flujo (véase figura 11).



Figura 11. Representación de calles de vórtices de Kármán. El flujo (de izquierda a derecha), ante un obstáculo (círculo a la izquierda), genera turbulencias que responden a un patrón dinámico ordenado: los vórtices se alinean de forma ordenada en dos calles.

Fuente: elaboración propia.

3.1.4 COLISIÓN DE VÓRTICES

Las turbulencias, de hecho, son procesos cuya dinámica presenta una alta sensibilidad a las condiciones iniciales, lo que hace generalmente impredecible su desarrollo geométrico. Basta observar la evolución de una gota de tinta agregada a un recipiente con agua para comprobar el desorden en las estructuras que surgen (véase figura 12).



Figura 12. Despliegue de una gota de tinta agregada a un vaso de precipitado con agua.

Fuente: elaboración propia.

A pesar de la alta sensibilidad de la dinámica de las turbulencias, pueden realizarse experimentos y observaciones que parecen verificar que, incluso en estos casos, para generar desorden, es necesario introducir desorden en el proceso. Así, Tee Tai Lim y Tomothy Bruce Nickels (1992) realizaron una prueba proyectando, dentro de un depósito de agua, dos porciones de tinta, utilizando para ello dos eyectores enfrenados que expulsaban la misma cantidad, simultáneamente y con igual potencia. Se observó que se formaban dos vórtices toroidales que, al colisionar frontalmente, producían estructuras complejas de distintas formas según la velocidad a la que la tinta era eyectada, pero siempre con simetría radial y complejas relaciones ordenadas (véase figura 13).

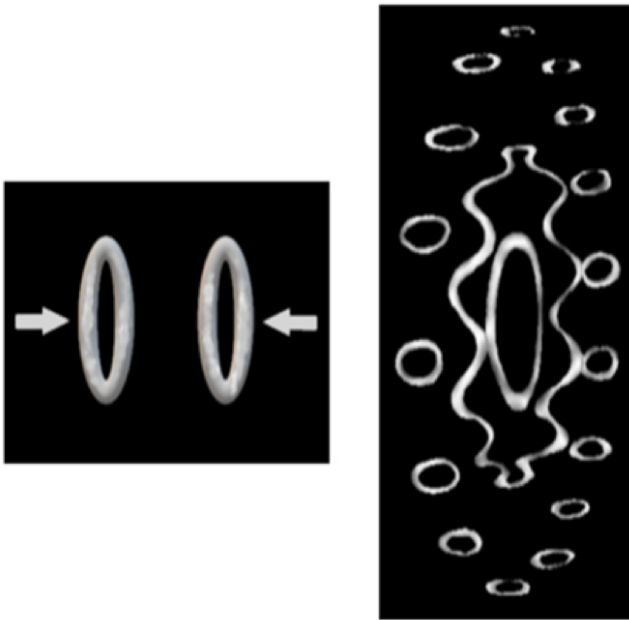


Figura 13. Representación de dos vórtices toroidales proyectados uno contra el otro (izquierda), y de la estructura que surge de la colisión (derecha).

Fuente: elaboración propia.

3.1.5 DANZA DE PÉNDULOS

La danza de péndulos es el resultado de un experimento ampliamente reproducido y estudiado sobre la dinámica de una serie de péndulos con hilos de distinta longitud, sujetos a una barra horizontal. En el modelo clásico, reproducido por Flaten y Parendo (2001), se fijan péndulos de manera equidistante, desde un extremo hacia el otro de la barra, en orden, en relación a las longitudes progresivas de los hilos, de modo que estos oscilen un distinto número entero de veces por minuto (*véase* figura 14).

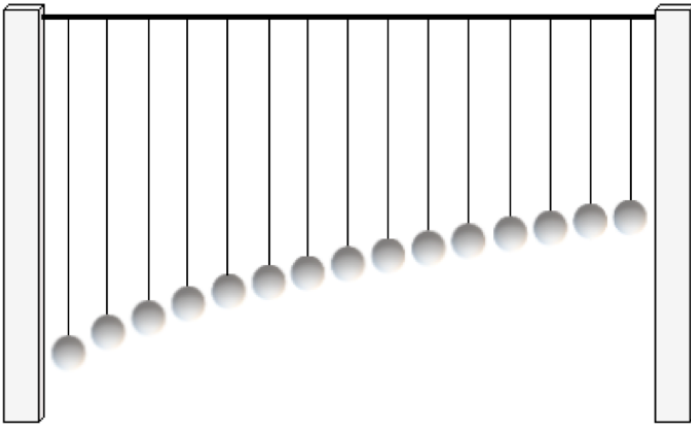


Figura 14. Estructura de soporte de péndulos simples con distinta longitud de hilo, que determinará un periodo de oscilación diferente para cada uno de ellos

Fuente: elaboración propia con base en el modelo de Flaten y Parendo (2001).

En este experimento, se desplazan todos los péndulos desde su posición de equilibrio y se liberan al mismo tiempo. La diferencia de fase entre cada péndulo y el siguiente se incrementa progresivamente. Visto desde arriba, el sistema mostrará distintos patrones ordenados, similares a ondas de frecuencias progresivamente cambiantes, que se repetirán periódicamente (*véase* figura 15).

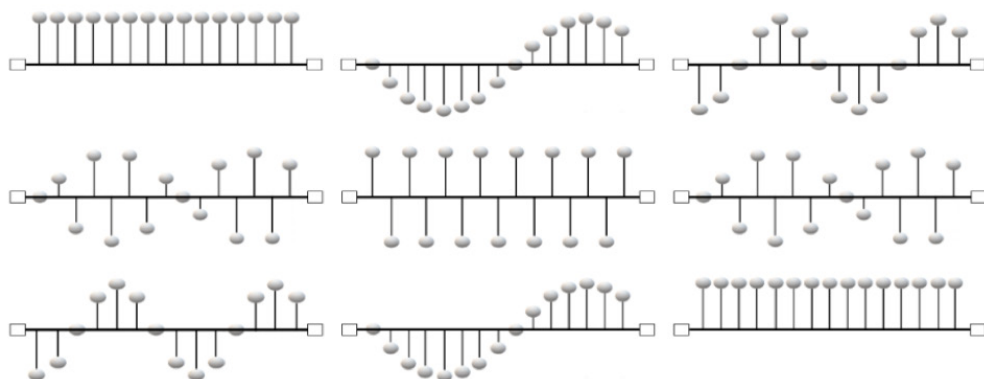


Figura 15. Nueve momentos de la danza de péndulos (de izquierda a derecha y de arriba a abajo), que se repiten periódicamente.

Fuente: elaboración propia con base en el modelo de Flaten y Parendo (2001).

3.1.6 ALGORITMOS GENERADORES DE ALEATORIEDAD

También en el campo de la computación encontramos evidencias de la necesaria implicación de desorden en el proceso de generación de una estructura con irregularidades, como se infiere claramente del artículo de Álvaro Ibáñez (2017) sobre programación y aleatoriedad:

Muchos programas de ordenador necesitan números aleatorios para funcionar ... Sin embargo, la aleatoriedad perfecta que atribuimos a objetos como monedas, dados o las bolas de un bombo, es algo difícil de alcanzar cuando se trata de generarla con ordenadores ... Un ordenador o un programa siempre dará los mismos resultados de salida ante los mismos datos de entrada. Al menos mientras no se introduzca entremedias algún tipo de factor aleatorio ... es precisamente en los generadores de números aleatorios donde está el problema. Si un generador está bien diseñado e implementado pasará por el mayor número de valores posibles antes de entrar en el ciclo (y esos posibles

valores serán muchos). Pero al final, tarde o temprano, acabará repitiéndose. ... Una solución de compromiso es utilizar factores externos, por ejemplo, los movimientos del ratón del ordenador o las milésimas de segundo que marca el reloj interno. Pero no suelen resolver el problema; por ejemplo, el reloj del ordenador puede coincidir en sus ciclos con los de los cálculos de la función aleatoria, y los movimientos del ratón están limitados por su precisión. Debido a todo esto, estos algoritmos tuvieron humildemente que cambiar de nombre y técnicamente se denominan generadores de números pseudo-aleatorios (Ibáñez 2017).

3.1.7 BOBINAS

Para poner a prueba esta hipótesis, decidí realizar otro experimento, inspirado en los patrones que surgen en la superficie de una bobina, cuando una cuerda con un diseño regular es enrollada uniformemente (véase figura 16).



Figura 16. Patrón emergente en el embobinado uniforme de una cuerda con diseño regular.
Fuente: elaboración propia.

La idea era representar cuerdas con distintos diseños periódicos y dibujarlas formando espirales para comprobar si en estas acababan apareciendo también patrones ordenados. Pero, como diseñar a mano espirales y cuerdas y no cometer errores de precisión era muy improbable, decidí representar tanto unas como las otras sobre una cuadrícula. Así, dibujé una espiral a modo de molde sobre la que, desde el centro, iría oscureciendo algunos de los cuadros, dejando una separación entre ellos, basada en una cuerda previamente diseñada. El resultado fue que, siendo ordenados los diseños de las cuerdas y el modo de disponerlas, tenía lugar siempre la emergencia de patrones ordenados (*véase* figura 17).

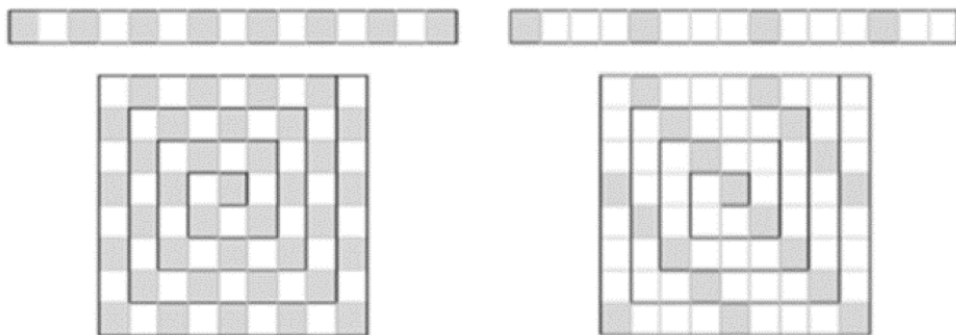


Figura 17. Patrones emergentes en embobinado de cuerdas con diseño regular.

Fuente: elaboración propia.

Algunas de las estructuras emergentes, por su complejidad, al principio parecían ser desordenadas, pero al extender un poco más el diseño, acababan siempre manifestando relaciones ordenadas (*véase* figura 18).

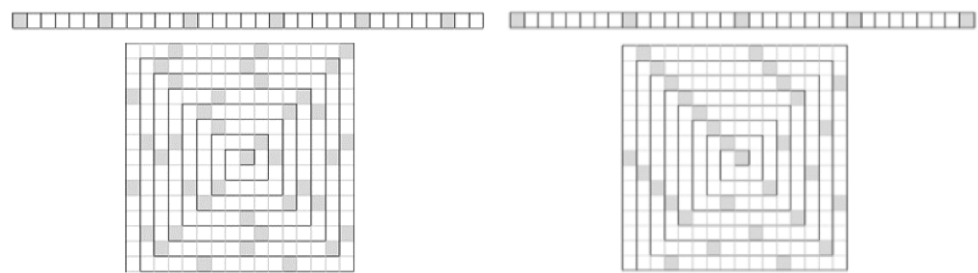


Figura 18. Patrones emergentes relativamente complejos en embobinado.

Fuente: elaboración propia.

En otra prueba, decidí diseñar una cuerda en la que la distancia entre los cuadros oscuros no fuese la misma, sino que aumentase progresivamente. El patrón emergente resultó ser una espiral cuadrangular de tres brazos (*véase figura 19*).

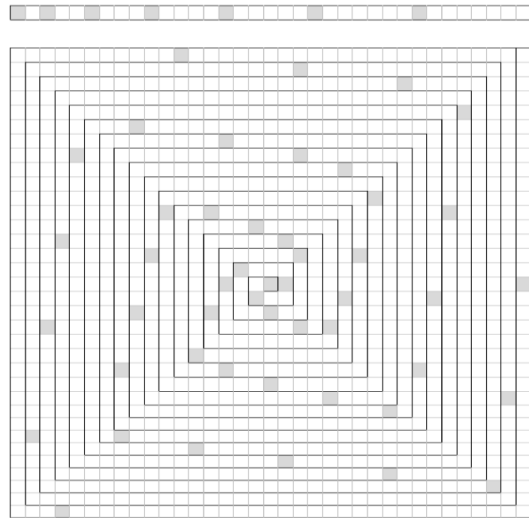


Figura 19. Patrón emergente en embobinado de cuerda con diseño regular progresivo.

Fuente: elaboración propia.

También quise probar a modificar la disposición de las cuerdas, para confirmar que era el orden de tales disposiciones, interactuando con el patrón regular de la cuerda, lo que determinaba la emergencia de relaciones ordenadas, y no solo la disposición espiral. El resultado seguía presentando orden (véase figura 20).

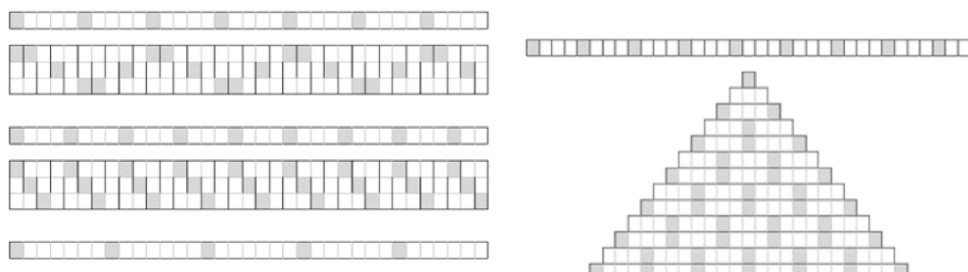


Figura 20. Patrones emergentes en disposiciones ordenadas no espirales.

Fuente: elaboración propia.

3.1.8 CONCLUSIÓN DE LAS OBSERVACIONES

Este hecho es reconocible en muchos otros experimentos y observaciones. La periodicidad de diversos procesos cíclicos perceptibles en nuestro planeta y desde él (el día y la noche, las estaciones, las fases lunares o las mareas) se debe a la dinámica regular del sistema solar. No es difícil prever que si el movimiento de rotación de la Tierra, por ejemplo, no fuese regular, sino que se invirtiese, se detuviese, se acelerase o decelerase desordenadamente, ninguno de esos ciclos podría esperarse. Tampoco resulta difícil prever que, aunque la dinámica de nuestro sistema planetario fuese distinta, siempre que fuese ordenada, tales fenómenos, aunque muy diferentes, seguirían mostrando orden. De hecho, todos los planetas e incluso los satélites con algún grado de inclinación axial presentan estaciones. Esta influencia de las regularidades dinámicas astronómicas en la ciclicidad de fenómenos geofísicos muestra hasta qué punto el proceso de generación de orden involucra estructuras de muy distinta

naturaleza. Y la regularidad de algunos de estos ciclos emergentes, como las estaciones, determina a su vez la generación de patrones ordenados incluso en estructuras orgánicas, como en el caso de los anillos de los troncos de los árboles, dependientes de fluctuaciones periódicas de temperatura, precipitaciones, luz, etcétera; hasta tal punto que la dendrocronología se basa en las irregularidades de estos patrones anulares para detectar y ubicar con relativa precisión irregularidades climáticas y de otra naturaleza (incendios, ataques de plagas) en el pasado. Igualmente, la esclerocronología permite reconocer fluctuaciones ambientales pretéritas en la morfología de las conchas de algunos moluscos cuyo crecimiento produce patrones concéntricos, relacionados con etapas de mayor o menor abundancia de alimento, temperatura u otros parámetros del entorno (*véase* figura 21).

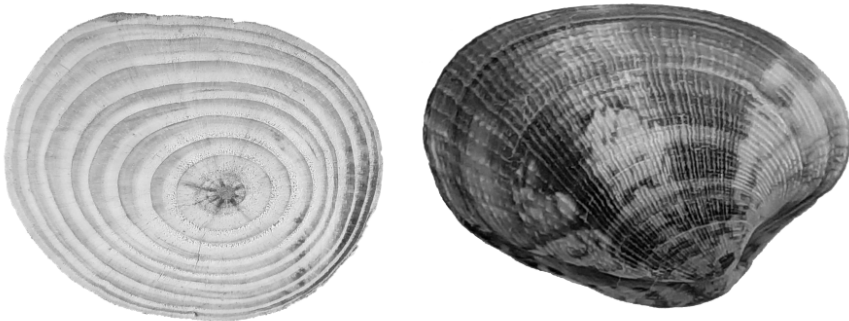


Figura 21. Estructuras orgánicas como el tronco de un árbol en su corte transversal (izquierda) o la valva de un molusco (derecha) muestran patrones concéntricos cuya regularidad depende de factores ambientales cíclicos.

Fuente: elaboración propia.

No es complicado realizar otras observaciones y experimentos sencillos que nos permitan poner a prueba este hecho, que podría expresarse en lo que considero plausible reconocer como un principio: “la interacción entre relaciones ordenadas producirá exclusivamente relaciones ordenadas”.

Después de comprobar que se cumple sin excepción en una multitud de otros casos, decidí investigar si una afirmación similar había sido ya expuesta, revisando toda la literatura en que creí que sería posible encontrarla, comenzando por el campo de las matemáticas, dado que uno de los ejemplos más simples, es la suma de sucesiones periódicas, que dará siempre como resultado otra sucesión periódica. Es decir, si tomamos varias sucesiones infinitas y ordenadas (construidas mediante la iteración de tramos) y sumamos sus componentes, la sucesión resultante presentará siempre una iteración de tramos (*véase* figura 22).

1, 2, 3, 1, 2, 3, 1, 2, 3, 1, 2, 3, 1, 2, 3, 1, 2, 3...
1, 2, 1, 2, 1, 2, 1, 2, 1, 2, 1, 2, 1, 2, 1, 2...

2, 4, 4, 3, 3, 5, 2, 4, 4, 3, 3, 5, 2, 4, 4, 3, 3, 5...

Figura 22. Dos sucesiones periódicas (arriba), la sucesión resultante de la suma de sus componentes (abajo) y los respectivos tramos iterados (subrayados).

Fuente: elaboración propia.

Aunque sabemos que la suma de funciones periódicas dará como resultado siempre una función periódica, no parece existir ningún principio que haga referencia a este hecho. Y aunque esta operación permite intuir la idea general que he expuesto (podría decirse que, *orden más orden produce orden*), tampoco he encontrado menciones a la posibilidad de extrapolarla a otros procesos. En la teoría de conjuntos, existe el concepto de *relación de orden*; sin embargo, en ese contexto hace referencia a una noción distinta a la aquí expuesta. Las relaciones de orden han de ser reflexivas, transitivas y *antisimétricas*, pero una relación *simétrica*, no es considerada una *relación de orden*. Es decir, en el caso de un conjunto de elementos iguales (en ese contexto se trataría de una relación simétrica), no se reconocería una relación de orden; en la sucesión “7, 7, 7, 7, 7, 7, 7...”, por ejemplo, desde la perspectiva de la

teoría de conjuntos, no hay relación ordenada. Parece por ello evidente que, a pesar del uso del mismo término, la teoría de conjuntos y la presente propuesta se basan en acepciones distintas de él.

Tampoco encontré una afirmación semejante sobre la generación de orden en la teoría de la computación. Exploré también textos de física y otros campos que incluyen en su estudio la generación de estructuras con relaciones ordenadas, como la astronomía (dada la esfericidad en objetos astronómicos, la formación de galaxias espirales o de anillos planetarios, y procesos como la resonancia orbital o el acoplamiento de marea) y la mecánica de fluidos (dada la formación y dinámica de vórtices) pero, hasta donde he podido profundizar, no he encontrado exposiciones próximas al principio aquí propuesto. Tampoco en tratados de cristalografía hallé más que una mención, aproximada en lo elemental, a la relación entre iteración y emergencia de patrones periódicos en las redes cristalinas (Buerger 1963), pero también sin referencias a la posibilidad de extrapolarla a otros contextos.

3.2 DESORDEN

Los principios o leyes más fundamentales suelen establecerse sobre situaciones ideales, sin considerar los diversos factores que, en realidad, afectan los procesos naturales. Así, por ejemplo, el principio de Arquímedes se expresa mediante un modelo en el que no se consideran la evaporación de parte del líquido, diferencias de temperatura, corrientes, etcétera, o el clásico problema sobre el punto y el momento en que se encontrarían dos vehículos que parten a una distancia y velocidad dadas, no pretende que sean tenidos en cuenta el viento, la fricción o los desniveles del terreno. Por supuesto, podrán valorarse esos factores, pero, si se pretende expresar la relación fundamental entre espacio, tiempo y velocidad, por ejemplo, se hará mediante un modelo ideal. Del mismo modo, el principio que aquí se propone alude a interacciones estrictamente ordenadas.

En la naturaleza, como decíamos, los diferentes procesos pueden verse afectados por diversos factores irregulares, y estas irregularidades pueden tener consecuen-

cias muy distintas; al menos, de tres tipos: en algunos casos, una pequeña irregularidad en el proceso de generación de una estructura puede provocar que esta se perciba como totalmente desordenada; en otros casos, un desorden en el proceso puede generar una estructura que responderá básicamente a un patrón ordenado, pero que presentará pequeñas irregularidades o defectos; en otros casos, la implicación de irregularidad en un proceso puede no generar desorden sino, incluso, un incremento de la complejidad de las relaciones ordenadas de la estructura emergente. En definitiva, el modo en que el desorden afecta los procesos de generación de estructuras es extremadamente complejo, y por ello, los objetivos de este trabajo se limitan a intentar exponer un posible principio elemental sobre la emergencia de orden en procesos en los que están implicadas exclusivamente relaciones ordenadas, aunque ello me impida pronunciarme sobre la influencia de irregularidades o desorden, más allá de lo que acabo de admitir.

3.3 ORDEN ESPONTÁNEO

Existen procesos particulares que pueden dar la impresión de que el orden surge de manera espontánea y sin la necesidad de un orden previo; sin embargo, un análisis más profundo descubre la necesaria implicación de relaciones ordenadas también en ellos. Un líquido, al ocupar un recipiente geométricamente regular, adquirirá la forma del interior de este, ordenándose; la forma del depósito fuerza, podríamos decir, la ordenación de los parámetros geométricos del líquido. Casos de emergencia de orden como este, o el de la disposición de la limadura de hierro afectada por un campo magnético, no parecen ofrecer nada interesante que investigar; pero existen otros casos similares, más complejos, que pueden llevar a abordar estas cuestiones asumiendo que el orden surge del desorden, y haciendo pasar desapercibidas posibilidades como la aquí propuesta. Algunos de ellos son la sincronización de metrónomos sobre una plataforma móvil (*véase* figura 23) o del parpadeo de las luciérnagas, ambos expuestos por Strogatz (2003) como ejemplos en su tesis; o la resonancia orbital de las lunas de Júpiter (*véase* figura 24) y el acoplamiento de marea, que sin-

croniza la rotación y traslación de un satélite y es responsable, por ejemplo, de que la misma cara de la Luna apunte siempre hacia la Tierra.

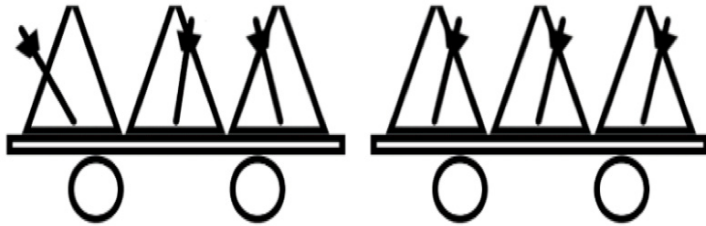


Figura 23. Varios metrónomos dispuestos sobre una plataforma móvil, activados a una velocidad dada e independientemente del estado inicial (izquierda), acabarán sincronizándose (derecha).

Fuente: elaboración propia.

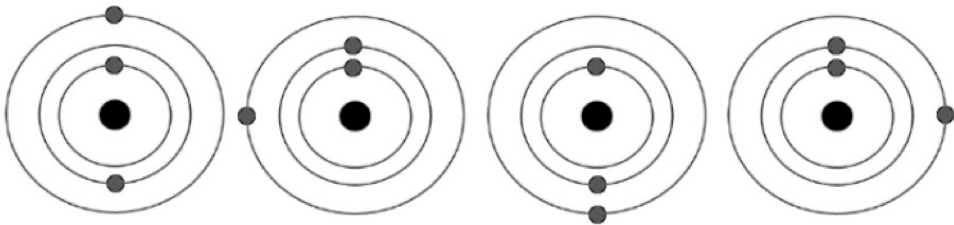


Figura 24. Resonancia orbital de Ganimedes (órbita exterior), Europa (órbita intermedia) e Ío (órbita interior) alrededor de Júpiter (centro). La figura muestra cuatro momentos del sistema (los satélites se desplazan en sentido antihorario) y cómo, cada vez que Ganimedes completa su órbita, los tres satélites ocupan la misma posición respectiva; Europa recorre su órbita dos veces, e Ío cuatro veces.

Fuente: elaboración propia.

Mientras en procesos simples, como la superposición de entramados o la suma de sucesiones periódicas, la emergencia de unas relaciones ordenadas a partir de la interacción de otras es tan evidente y clara, en los casos que acabo de mencionar, puede dar la impresión de que el orden surge de otro modo. En ellos, la interacción de relaciones ordenadas también es la responsable de la emergencia de nuevas relaciones ordenadas, aunque de manera más discreta. Estas relaciones, a veces invisibles (como la geometría del campo magnético generado por un imán) y a veces aparentemente insignificantes (como la homogeneidad del fluido que ocupa un recipiente o de la limadura de hierro), son determinantes en la generación de nuevas relaciones ordenadas. Así, si en un recipiente, por regular que sea, volcamos una variedad de elementos irregulares, o si exponemos a un campo magnético objetos de distinta composición, forma y tamaño, obtendremos patrones de distribución irregulares. Igualmente fenómenos como la resonancia orbital o la sincronización de marea son posibles dada la estabilidad del efecto de las leyes físicas que los rigen; pues si la atracción gravitacional, por ejemplo, no estuviese establemente relacionada con las masas y la distancia entre los cuerpos, sino que fuese irregular o fluctuase desordenadamente, tales fenómenos no ocurrirían. El motivo es que la estabilidad, como la homogeneidad, no es otra cosa que relaciones ordenadas, y su implicación en los respectivos procesos es por tanto determinante en cuanto a la emergencia de nuevas relaciones ordenadas.

3.4 TERMODINÁMICA Y ESTRUCTURAS DISIPATIVAS

Una de las reacciones críticas que suelen surgir ante cualquier propuesta sobre la generación de orden es considerarla contraria al segundo principio de la termodinámica, a menudo interpretado como la afirmación de una tendencia general al desorden. Sin embargo, dicha interpretación es, en mi opinión, fruto de una noción del concepto orden, necesariamente distinta a la aquí propuesta. Esto puede entenderse revisando uno de los ejemplos más simples de dicho principio, y contemplándolo desde la perspectiva aquí desarrollada. Si comparamos dos plantillas, una constituida por números aleatorios y otra por un mismo número, podremos reconocer en ellas desorden y orden respectivamente (*véase* figura 25).

1 3 5 4 2 6 3 1 3 4 6 8 4	7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7
8 5 8 3 5 7 7 5 3 2 9 6 6	7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7
4 2 5 6 7 7 5 3 0 7 4 9 0	7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7
1 5 6 8 7 3 4 8 6 1 5 7 5	7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7
3 2 5 7 1 1 6 8 7 7 3 2 3	7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7
6 8 7 9 7 4 5 4 3 6 6 5 4	7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7

Figura 25. Plantillas constituidas por números elegidos al azar (izquierda) y por un mismo número (derecha), en las que reconoceríamos desorden y orden, respectivamente.
Fuente: elaboración propia.

Si vertemos agua a distintas temperaturas en un depósito e inmediatamente realizamos una lectura de la temperatura en diversos puntos, obtendremos un resultado similar al representado en la primera plantilla. Después del tiempo suficiente, en todos los puntos mediremos la misma temperatura. Vemos cómo expresar la tendencia al equilibrio térmico como tendencia al desorden hace evidente una acepción del concepto, en todo caso, distinta a la aquí expuesta.

Es cierto que si la distribución del líquido a distintas temperaturas respondiese a un patrón regular de una determinada complejidad, al equilibrarse la temperatura, desaparecerían tales relaciones ordenadas. Es decir, si llenásemos un depósito con agua, por ejemplo, a 1 °C y a 8 °C, respetando un patrón de distribución regular, tendríamos relaciones ordenadas de un cierto grado de complejidad (*véase* figura 26).



Figura 26. Representación de tres recipientes con agua a distintas temperaturas (1 °C y 8 °C) con patrones ordenados de distribución.

Fuente: elaboración propia.

De nuevo, el líquido tendería al equilibrio térmico y, en cualquier punto del depósito, se acabaría alcanzando la misma temperatura. Aunque relaciones ordenadas de cierta complejidad habrían desaparecido, no se habría producido desorden. Son, probablemente, casos como este, en que algunas relaciones ordenadas desaparecen, el motivo por el que a menudo se recurre intuitivamente a interpretar el incremento de entropía como un aumento del desorden.

3.4.1. LA PERSPECTIVA DE PRIGOGINE

A pesar de lo mencionado arriba, podemos encontrar diferentes propuestas que relacionan el segundo principio de la termodinámica y los casos de emergencia de orden. Así, Prigogine (1984) crea el concepto de estructura disipativa y recurre, como ejemplo ilustrativo de tesis, a la convección de Rayleigh-Bénard (Getling 1998): si en un recipiente una capa de líquido es calentada desde abajo, el calor se extenderá por conducción, pero a partir de una cierta diferencia de temperatura entre la parte inferior y la superior del líquido, se generarán corrientes convectivas que acabarán ordenándose en celdas hexagonales, por el centro de las cuales ascenderá el fluido más caliente y por cuyos bordes descenderá el que está a menor temperatura (véase figura 27).

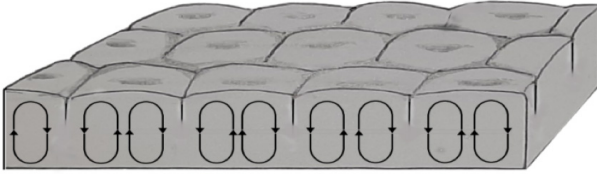


Figura 27. Representación de convección de Rayleigh-Bénard.

Fuente: elaboración propia.

Prigogine (1984) concluye que los sistemas abiertos lejanos al equilibrio producen patrones ordenados. Sin embargo, tal afirmación admite, en mi opinión, tres objeciones, que expondré en los siguientes tres apartados: la determinación del punto de lejanía, la noción de orden a la que se alude y la marginación de los procesos que no implican energía.

3.4.1.1. DETERMINACIÓN DE LA LEJANÍA

Un sistema en equilibrio es completamente estable: ni dinámicas ordenadas, ni ningún otro proceso físico tendrá lugar sin disequilibrio energético. Es cierto que Prigogine (1984) no habla de “sistemas en disequilibrio”, sino de “lejanos al equilibrio”, sugiriendo que es cierta lejanía, cierto grado de disequilibrio, el responsable de la emergencia de orden. Esto parece coherente con la observación del paso de transmisión térmica por conducción a la generación de corrientes convectivas a partir de cierto gradiente en el experimento citado. Sin embargo, Prigogine no establece esa supuesta distancia responsable de la emergencia de orden, que sería muy relevante.

De hecho, sobre un estanque, podríamos suspender una esfera con un hilo, sustituyéndola por esferas progresivamente más pesadas y, en algún momento, el hilo se rompería y la esfera caería, produciéndose en la superficie del agua ondas anulares concéntricas. Sin embargo, concluir que, “a partir de cierta energía potencial, se desencadenan procesos generadores de orden”, no aportaría gran cosa como explica-

ción causal de estos fenómenos. Tampoco podríamos establecer la energía potencial necesaria que, en ese mismo experimento, dependería de la resistencia del hilo.

También en los experimentos de Chladni (*véase* sección 3.1.1), en que la energía aplicada es una vibración, podemos observar que, independientemente de la frecuencia e intensidad de esta, emergerán siempre patrones ordenados (como se ha mostrado: si la placa es geométricamente regular, la vibración estable y el granulado homogéneo). Y por otra parte, la misma energía aplicada a placas de geometría irregular, no producirá patrones ordenados, por lo que parece evidente que la cantidad de energía no es siempre un factor relacionado a la emergencia de orden.

De la misma manera, e independientemente del gradiente térmico en el experimento de convección citado, si introducimos en el proceso relaciones no ordenadas (una corriente irregular, la mezcla heterogénea de fluidos de distinta densidad, irregularidades geométricas en el recipiente, etcétera), los patrones emergentes no presentarán tales relaciones ordenadas.

3.4.1.2 NOCIÓN DE ORDEN

Por otra parte, al menos desde la noción de orden aquí expuesta, la transmisión de calor por conducción, antes de la aparición de corrientes convectivas, también presenta relaciones ordenadas: la temperatura se distribuye ordenadamente en estratos superpuestos. Cuando surgen las corrientes convectivas lo que tiene lugar es, en todo caso, un incremento de la complejidad de los patrones.

3.4.1.3 CASOS QUE NO IMPLICAN ENERGÍA

Por último, mientras algunas investigaciones sobre la emergencia de orden pueden limitar su estudio a procesos que implican flujos de materia o energía, el principio sobre la generación de orden que aquí se ha propuesto es aplicable a interacciones entre objetos abstractos, como la suma de sucesiones numéricas (*véase* sección 3.1.8),

y otros casos en los que no interviene dinámica ni energía alguna, como la superposición de entramados o el embobinado de cuerdas (*véanse* secciones 3.1.2 y 3.1.7, respectivamente). En este trabajo no se niega, en absoluto, la tendencia general al equilibrio termodinámico, sino que se pretende una aproximación a los procesos de generación de orden, desde el análisis de los casos más simples, sin aludir (pues no veo necesidad de ello) a ninguno de los principios de la termodinámica. Hacerlo, además, conllevaría una visión sesgada que implicaría, como acabo de exponer, la marginación de un importante grupo de estructuras (los objetos abstractos), al que sí abarca y en el que parece reafirmarse el principio propuesto.

Cuando hablamos de procesos, solemos pensar automáticamente en acontecimientos físicos, pero es importante tener en cuenta que los procesos pueden también tener lugar en un contexto abstracto. Si creamos un programa tal que, al introducir una sucesión de números, este genere una nueva sucesión, multiplicando por dos cada uno de los números de la serie introducida, o si trazamos la diagonal de un cuadrado, o realizamos cualquier operación matemática, podemos también hablar de procesos. Podemos, porque parten de unas condiciones iniciales, operan de una determinada forma, y producen un resultado consecuente de aquellas condiciones iniciales y formas de operar. De hecho, podremos incluso establecer pronósticos sobre los resultados: que los componentes de la sucesión generada por aquel programa serán siempre pares; que independientemente del tamaño de un cuadrado, el trazo de su diagonal generará siempre dos triángulos rectángulos, o que la multiplicación de dos números impares dará siempre como resultado un número impar.

Si el orden está presente en estructuras físicas, pero también en estructuras abstractas, y si el principio propuesto se cumple tanto en procesos físicos como en procesos abstractos, parece evidente que dicho principio excede el mundo físico. Y si es así, no podrá, en mi opinión, encontrar su causa en elementos físicos como la energía o en los principios termodinámicos.

Nada de lo aquí expuesto permite negar la posibilidad de otros principios, mecanismos o factores, implicados en los procesos de generación de orden y con efecto, quizá, en dominios concretos, como el de los procesos físicos, biológicos, entre otros. Y tal vez, esos otros posibles principios o mecanismos cooperen asistiendo, o siendo

asistidos por el principio aquí propuesto, pero, al menos en mi opinión, este último es general, por cuanto parece gobernar a todos los procesos.

4. IMPLICACIONES

Existen casos en que todo lo expuesto puede resultar contraintuitivo. Estamos tan familiarizados con el modo en que un jarrón o una copa se rompen al caer, en fragmentos irregulares y de distinto tamaño, distribuyéndose desordenadamente por el suelo, que parece que el desorden pueda surgir del orden, de la perfecta simetría radial que presentaban tales estructuras antes de romperse. Sin embargo, los patrones de rotura son, como las turbulencias, resultado de procesos altamente sensibles a las condiciones iniciales. Son las más mínimas irregularidades, a veces microscópicas, incluso pequeñas diferencias de temperatura, las que desencadenan estos patrones de rotura irregular. De hecho, otra conclusión sería contraria a la razón, pues, si imaginamos un jarrón con una simetría perfecta, incluso en el nivel subatómico, que cayese en una verticalidad perfectamente calibrada sobre una superficie también perfectamente lisa y nivelada y, en definitiva, en un proceso limpio de irregularidades, todo el sistema respondería a un patrón de simetría. Esperar que a un lado y otro de su eje se produjesen resultados distintos sería esperar resultados distintos de procesos idénticos. Esto puede inferirse de la estructura generada en la colisión de vórtices (véase sección 3.1.4) y, al mismo tiempo, da una idea de la extrema meticulosidad con la que necesariamente Lim y Nickels (1992) reprodujeron el experimento. Me atrevería incluso a afirmar que, asumiendo la hipótesis de que el universo se generase a partir de la nada en un fenómeno singular, y dado que la nada no presenta irregularidades, algún desorden debió afectar su origen o alguna etapa de su desarrollo, dadas las irregularidades estructurales que observamos. De otro modo, incluso diría que el universo debería responder a un estricto patrón de simetría radial y que probablemente no hubiesen podido generarse más que estructuras relativamente simples.

Sin embargo, al margen de opiniones tan especulativas y discutibles, el principio expuesto implica algunas cuestiones más estrechamente relacionadas con el asunto

to que motiva este trabajo. Y admito que los siguientes apartados también resultarán especulativos y discutibles por la extensión que precisaría un desarrollo aceptable de su argumentación, pero intentaré exponer algunos de los hechos que relacionan todo lo anterior con la explicación causal de un posible proceso evolutivo general, aunque se trate solo de esbozarlos, en que el orden se manifiesta en estructuras progresivamente más complejas. En el primero de ellos (4.1 Mecanismo) intentaré explicar que el principio propuesto podría dar cuenta del más fundamental de los tres elementos necesarios para constituir un mecanismo evolutivo. En el segundo (4.2 Organización), trataré de mostrar que la organización es, en realidad, una relación ordenada, y algunas implicaciones de esa afirmación.

4.1 MECANISMO

De ser cierto que el orden se manifiesta en estructuras progresivamente más complejas, el principio sobre la generación de orden descrito podría constituir el más fundamental de los tres elementos necesarios para la explicación causal de dicho proceso, pues un mecanismo evolutivo debería dar cuenta, al menos, de tres hechos:

- Variación: las estructuras deben experimentar cambios, mostrando diferencias entre las distintas generaciones.
- Conservación de la propiedad: las estructuras, a pesar de las variaciones intergeneracionales, deben conservar la propiedad que las identifica: el orden.
- Incremento de complejidad: el proceso debe mostrar una tendencia general al incremento de la complejidad de las relaciones ordenadas.

4.1.1 VARIACIÓN

La variación es evidente en los ejemplos expuestos en la sección 3. Y no solo tiene lugar una variación sutil de algunas características, como en la superposición de entramados, que genera nuevos entramados, o en la suma de sucesiones numéricas, que produce nuevas sucesiones, sino que el proceso implica estructuras muy distintas. Relaciones ordenadas en la dinámica astronómica de nuestro sistema planetario son responsables de relaciones ordenadas en procesos geofísicos como las estaciones que, a su vez, determinan relaciones ordenadas en estructuras orgánicas, como se ha mostrado en el apartado 3.1.8. De modo que la variación de tales relaciones no solo se da, sino que lo hace entre estructuras de muy distinta naturaleza.

4.1.2 CONSERVACIÓN DE LA PROPIEDAD

El principio que aquí se ha propuesto parece dar cuenta, al menos, de la conservación de la propiedad, el orden, pues este continúa manifestándose en las distintas estructuras a pesar de las variaciones intergeneracionales.

4.1.3 INCREMENTO DE COMPLEJIDAD

Por último, el incremento de complejidad parece una consecuencia de las dos afirmaciones anteriores, pues si la interacción entre relaciones ordenadas produce relaciones ordenadas distintas, se incrementará el número y variedad de ellas coexistiendo y susceptibles de interactuar; a su vez, la mayor diversidad de interacciones generará relaciones ordenadas más diversas, y así sucesivamente. Es decir, en general, más relaciones ordenadas permiten más interacciones, y más interacciones producen más relaciones ordenadas, dándose, al menos, un incremento del número y variedad de estas; pero también, por tanto, de la variedad de niveles de complejidad.

Sin embargo, no toda interacción implica un aumento de complejidad. Una bobina con un patrón tan simple como una línea horizontal es resultado del emboinado de una cuerda con un diseño ordenado, como era de esperar, pero de elevada complejidad respecto al patrón emergente. El número de espacios entre un motivo y el siguiente, aumenta progresivamente: “0, 3, 4, 7, 8, 11, 12, 15, 16, 19, 20, 23, 24...” (véase figura 28).

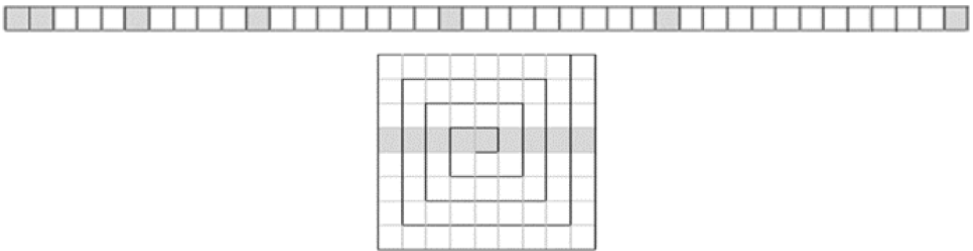


Figura 28. Cuerda con diseño progresivo relativamente complejo, cuya disposición espiral genera un patrón relativamente simple.

Fuente: elaboración propia.

Pero estos casos son excepcionales, y estructuras de cierto grado de complejidad solo podrán producirse como resultado de interacciones entre estructuras de cierto grado de complejidad. Es decir, en general, las estructuras más complejas podrán producir estructuras más complejas. Y esto es observable al analizar la transición entre estructuras de muy distinto grado de complejidad (como átomos y animales), que estará siempre intermediada por multitud de estructuras de complejidad intermedia (moléculas, unicelulares, pluricelulares, cada vez más complejos).

Por último, considero muy importante notar que, en general, las propias interacciones serán más complejas cuando se den entre estructuras más complejas y que esto es extensible a los propios procesos de generación y mecanismos evolutivos, que evolucionarán adquiriendo también complejidad.

4.2 ORGANIZACIÓN

A partir de la noción de orden expuesta, parece posible una clasificación, al menos elemental, de las relaciones ordenadas. Podríamos establecer un grupo para las geométricas, que incluiría relaciones tan simples como las simetrías y, dentro de ese subgrupo, podríamos reconocer la simetría bilateral como la más simple, la radial como algo más compleja, y la fractal como la más compleja de ellas. Serían también relaciones ordenadas geométricas las de las espirales, polígonos y poliedros regulares, teselados, etcétera. Otro grupo lo constituirían las relaciones espaciotemporales o dinámicas, pudiendo encontrar entre las más simples las de desplazamientos rectilíneos a velocidades constantes, algo más complejas las de movimientos acelerados, y mucho más complejas las de sistemas orbitales. Muchas de estas relaciones podrían, además, combinarse ordenadamente en una misma estructura. También podríamos, al margen de las perspectivas geométrica y dinámica, reconocer una relación “de pertenencia”, pues el hecho de pertenecer a una misma estructura es una característica común de todos sus componentes y, por tanto, una relación ordenada.

Sin embargo, hay un tipo de relación ordenada particular que, en mi opinión, es el más complejo que puede darse, y está tal vez mejor representado por el término organización. Si observamos los órganos y tejidos que constituyen a un ser vivo, o los componentes de un motor o de una herramienta, vemos que estos no tienen por qué presentar características comunes en cuanto a su geometría, dinámica, composición, disposición, temperatura, color, etcétera. La característica que comparten los componentes de estas estructuras es la implicación en una misma función.

Como he dicho, este tipo de relación ordenada, que podría entenderse como orden funcional, es en mi opinión el más complejo que puede presentar una estructura. Hablaríamos de estructuras organizadas que, como no podría ser de otro modo, no existen en las primeras etapas de la evolución del universo, hasta la aparición de la funcionalidad (probablemente con las primeras moléculas capaces de reproducirse) y volverán a darse solo después de ese momento, ya sea en las formas orgánicas, en las sociedades, en el lenguaje o en las estructuras creadas por el hombre u otros organismos, entre una multitud de otros casos.

Recordando aquella posibilidad de deducir una parte de una estructura a partir del análisis del resto de ella (*véase* sección 2.1), vemos que en las estructuras organizadas esta operación es también factible, pero deberá basarse en criterios funcionales. Así, aunque nunca hubiésemos visto una bicicleta, si encontrásemos una a la que le faltase la rueda delantera (*véase* figura 29), podríamos, a partir de la observación de las hendiduras para los dedos en las empuñaduras del manillar, de la disposición y forma del asiento y de los pedales, deducir que está ideada para sostener a una persona y en qué posición; y observando el desgaste de la cubierta de la rueda posterior, y que esta gira accionada por los pedales, podríamos deducir que se trata de un medio de transporte y cómo funciona; y por la forma de la horquilla, concluir que lo que falta es una rueda libre en la parte frontal, móvil a través del manillar, lo que permitiría controlar la dirección. Es decir, podríamos deducir, a partir de su función, el componente que falta.



Figura 29. Una bicicleta sin la rueda delantera es una estructura funcional incompleta. Aun no conociéndola, comprendiendo su función, podríamos deducir la parte que falta.

Fuente: elaboración propia.

Podemos también imaginar que encontramos el fósil de un organismo extinto que, aun reconociendo que se trata de un reptil, nos resultase desconocido, y del que solo se conservase la mitad izquierda (*véase* figura 30). A pesar de que algunos organismos presentan asimetrías adaptativas, como es notable en los machos del

cangrejo violinista del género *uca*, dado que en los vertebrados es predominante la simetría bilateral, podríamos especular sobre la forma completa de su estructura ósea con poca probabilidad de equivocarnos, pero estaríamos basándonos en relaciones geométricas.



Figura 30. Representación de la mitad izquierda del fósil de un reptil ficticio, que nos permitiría considerar la simetría bilateral para establecer pronósticos sobre su estructura ósea completa.

Fuente: elaboración propia basada en fósiles de reptiles.

Sin embargo, si lo que encontrásemos fuese la mitad anterior (*véase figura 31*), para formular expectativas sobre la parte posterior, deberíamos basarnos principalmente en relaciones funcionales.

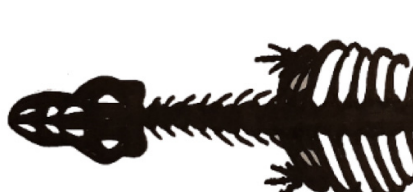


Figura 31. Representación de la mitad anterior del fósil de un reptil ficticio, que nos obligaría a considerar principalmente relaciones funcionales para establecer pronósticos sobre su estructura completa.

Fuente: elaboración propia basada en fósiles de reptiles.

Si bien podríamos esperar relaciones de orden geométrico entre las partes anterior y posterior, como la segmentación de la espina dorsal, serían unas extremidades anteriores demasiado cortas para la locomoción las que nos permitirían deducir que las posteriores deberían ser suficientemente robustas para soportar el peso del animal; o la forma poco estilizada de la parte anterior del cuerpo la que nos induciría a pensar que no se trata de una especie acuática; o las piezas dentales las que llevarían a deducir que se trata de un depredador y que, por tanto, las extremidades posteriores deberían facilitar un desplazamiento veloz, o que la cola debería tener unas dimensiones que permitiesen el equilibrio al desplazarse, etcétera. Pero el objetivo de estas exposiciones no es elaborar una clasificación de las relaciones ordenadas, ni analizar qué proporción de ellas, en las estructuras organizadas, son estrictamente funcionales, sino mostrar que la organización también es una relación ordenada.

Por su alta complejidad y naturaleza única, por su particular modo de generarse, y por los complejos mecanismos que impulsan su evolución, puede pensarse que las estructuras organizadas están completamente al margen de todo cuanto se ha expuesto en las secciones anteriores sobre el orden y cómo este se genera. De hecho, la complejidad estructural del más simple de los organismos, de un motor de explosión, de un sistema social o del lenguaje los hace mucho más difíciles de describir que cualquier cristalización mineral, dinámica planetaria, fenómeno geofísico o reacción química. Cualquier proceso de reproducción biológica, el proceso tecnológico que implica el desarrollo de una herramienta o el proceso histórico que da lugar a un determinado sistema social, será también notablemente más complejo que los procesos de generación de cualquier estructura anterior a la organización, consistentes prácticamente en la agregación de estructuras preexistentes e interacciones relativamente simples. Y el mecanismo que explica la evolución biológica, así como las explicaciones causales de la evolución tecnológica, lingüística o social, será siempre más complejo que el esbozado en el apartado anterior (*véase* sección 4.1 Mecanismo). La organización es particular hasta tal punto, que todo lo expuesto en las secciones anteriores podría parecer más o menos encuadrable en el campo de las matemáticas y, sin embargo, al considerarla, el asunto parece tan inabarcable por estas como la biología o la política.

Pero también es posible una lectura completamente contraria y que encuentro más convincente, pues la emergencia de la organización es el fenómeno más esperable de un proceso evolutivo generador de relaciones ordenadas progresivamente más complejas. En primer lugar, porque se trata de una relación ordenada. En segundo lugar, porque lo que la hace tan distinta es su complejidad; precisamente la tendencia del presunto proceso que tratamos. Por último, la complejidad de los procesos que generan las distintas estructuras organizadas y de los mecanismos que impulsan su evolución no parece otra cosa que una manifestación de cómo el incremento de la complejidad de las estructuras se refleja en el incremento de la complejidad de sus propios procesos de generación y mecanismos evolutivos. En lugar de parecer contradictoria a la idea de un proceso evolutivo general, la emergencia de la organización parece una confirmación del mismo.

La funcionalidad, de hecho, podría determinar el momento más importante en dicho proceso evolutivo general, dividiéndolo en dos etapas bien diferenciadas. La aparición simultánea de la funcionalidad, y por tanto de la organización, así como de la selección natural, parece constituir incluso una transición más nítida y relevante en dicho proceso que otros eventos como el propio origen de la vida.

Existen, de hecho, distintas hipótesis sobre cómo surgió la primera estructura que podríamos considerar un ser vivo, y en todas ellas son fundamentales procesos como la reproducción y la transmisión de información, el metabolismo o la delimitación de la propia estructura por una membrana. Las distintas propuestas consideran más identificativas de la vida una u otra de estas propiedades, o un conjunto determinado de ellas, y tratan de dilucidar en qué orden se dieron, pues sería un dato de gran importancia para la resolución de la cuestión. Sin embargo, y aunque conociésemos con todo detalle cada etapa del proceso abiogénico, el momento preciso en que surge el primer ser vivo no sería, quizá en absoluto, súbitamente aceptado en consenso, porque implicaría la problemática aplicación del difuso concepto de vida a una estructura concreta, y podría establecerse solo acordando un criterio para ello, que entrañaría seguramente el enfrentamiento de muy diversas opiniones. No sería tan problemático establecer, creo, el momento preciso de emergencia de la primera estructura organizada, en que los componentes no comparten propiedades exclusi-

vamente geométricas o dinámicas, sino la de estar implicados en el desempeño de una determinada función.

Tampoco es sencillo establecer qué distingue a una función de cualquier otro proceso, y quizá solo sea posible hacerlo tomando otro proceso como referencia (Caponi 2020). Asumiendo esa tesis, un criterio en que podríamos basarnos para distinguir los procesos funcionales es el incremento de la eficiencia en la consecución del resultado. Es decir, aunque las estrellas más pequeñas fusionan una variedad muy limitada de elementos, y las más masivas pueden producir una variedad mucho mayor de ellos, las estrellas no son cada vez más masivas, de modo que pueda apreciarse un aumento en su eficiencia; no es apreciable tampoco una evolución en los tipos de volcanes que les permita generar mayor cantidad de lava; ni las nubes han experimentado cambios hacia formas que precipiten mayores cantidades de agua; ni el oxígeno se ha vuelto cada vez más oxidante. Sin embargo, el aparato digestivo de los organismos, sus distintos sistemas de locomoción o sus órganos sensoriales muestran un progresivo aumento en su eficiencia a través de su evolución; estructuras tecnológicas como los medios de transporte podrán llegar más lejos, a mayor velocidad o transportar un mayor número de personas o cargas más pesadas; y los distintos lenguajes permitirán transmitir información progresivamente más compleja y de modo más eficiente.

Desde esta perspectiva, las primeras moléculas capaces de autorreplicarse estarían llevando a cabo, probablemente, el más complejo proceso de generación de estructuras hasta ese momento; pero, aun así, no estarían realizando una función ni serían, por tanto, estructuras organizadas. Sin embargo, en el momento en que tal replicación resultase “defectuosa”, irregular, pudiendo producir moléculas distintas, en la mayoría de los casos quizá incapaces de reproducirse, pero al menos en alguna ocasión capaces de hacerlo más eficientemente, entraría en acción la selección natural favoreciendo la proliferación de tales variedades. Y al darse un incremento de la eficiencia, en la que podríamos considerar la primera función, la reproducción, podríamos hablar también de estructuras organizadas. Así, simultáneamente aparecerían: la función, mostrando distintos grados de eficiencia; la organización, la más compleja de las relaciones ordenadas; y la selección natural, un nuevo mecanismo

evolutivo, tan complejo como las novedades que acompaña, y primer impulsor de la complejidad de las estructuras organizadas.

Sin embargo, tampoco será la selección natural el único mecanismo evolutivo de las estructuras organizadas, pues más adelante sistemas sociales, tecnología, lenguaje o cultura evolucionarán de modos más complejos y requerirán explicaciones causales y la descripción de mecanismos evolutivos aún más complejos, con base todos ellos, probablemente, en la sinergia, como principal factor impulsor del incremento de su complejidad (Montilla 2021).

5. CONCLUSIÓN

Considero interesante incentivar la discusión de estos asuntos, pues parece evidente que en general no podemos justificar que el orden surja del desorden, sino de un orden previo, en contra de la hipótesis del azar como principio generativo, que en nuestra cultura científica se ha convertido casi en un dogma inamovible. Creo que la emergencia de relaciones ordenadas a partir de procesos aleatorios, aunque posible, es accidental, y no puede considerarse responsable ni de la diversidad ni de la complejidad alcanzada por estas. Basta pensar que si arrojásemos repetidas veces tres objetos, es posible que en alguna ocasión estos terminasen dispuestos a igual distancia uno de otro, coincidiendo con los vértices de un triángulo equilátero; pero es evidente también que si arrojásemos cinco objetos, esperando que su distribución coincidiese con los vértices de un pentágono regular, deberíamos también esperar un número de lanzamientos mucho mayor. Es decir, si bien eventualmente pueden surgir relaciones ordenadas por azar, lo más probable es que estas sean muy simples; y mientras mayor sea la complejidad de tales relaciones ordenadas de origen casual, más improbable será que se dé su aparición. Y dada la multitud, variedad y, sobre todo, complejidad, de las relaciones ordenadas que muestran las diversas estructuras existentes, será siempre más plausible que su emergencia esté determinada por mecanismos evolutivos, no exclusivamente darwinianos, sino fundados en principios más elementales y próximos a tesis como las de la autoorganización, que por un cúmulo

de eventos casuales. Este trabajo pretende incentivar y contribuir en alguna medida a la consideración de tales perspectivas que, defendidas actualmente por investigadores como Eugenio Andrade (2011) o Stuart Kauffman (1993, 1995) entre otros, invitan a tomar seriamente el orden como objeto de estudio.

TRABAJOS CITADOS

- Andrade Pérez, Luis Eugenio. *La ontogenia del pensamiento evolutivo*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2011.
- Bergson, Henri. *La evolución creadora*. 1907. Argentina: Editorial Cactus, 2007.
- Bertalanffy, Ludwig. *Teoría general de los sistemas*. México: Fondo de Cultura Económica, 1976.
- Buerger, Martin Julian. *Elementary Crystallography*. New York: John Wiley and Sons, 1963.
- Caponi, Gustavo Andrés. “The Darwinian Naturalization of Teleology”. *Life and Evolution: History, Philosophy and Theory of the Life Sciences* 26 (2020): 121-142. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-39589-6_8>
- Chladni, Ernst Florenz Friedrich. *Entdeckungen über die Theorie des Klanges* [Descubrimientos sobre la teoría del sonido]. Leipzig: Weidmanns Erben und Reich, 1787.
- Darwin, Charles. *El origen de las especies*. 1859. Barcelona: S.L.U. Espasa, 1998.
- Flaten, James y Kevin Parendo. “Pendulum Waves: A Lesson in Aliasing”. *American Journal of Physics* 69.7 (2001): 778-782. <<https://doi.org/10.1119/1.1349543>>
- Getling, Alexander. *Rayleigh-Bénard Convection: Structures and Dynamics*. Singapore: World Scientific Publishing Company Incorporated, 1998. <<https://doi.org/10.1142/3097>>
- Hayek, Friedrich August. *Law, Legislation and Liberty*. 3 vols. Chicago: The University of Chicago Press, 1973; 1976; 1979.

- _____. *Entwicklung und Spontane Ordnung* [Evolución y orden espontáneo]. 33rd Lindau Nobel Laureate Meeting (11th Meeting in Chemistry). 1983. <<https://www.youtube.com/watch?v=vQgOADp6pxA>>
- Hegel, Georg Wilhelm Friedrich. *Lecciones sobre la filosofía de la historia universal*. 1822. Madrid: Alianza, 2004.
- Ibáñez, Álvaro. “Cómo generar números al azar con ordenadores que no son tan aleatorios”. *El País* 3 ag. 2017. <https://elpais.com/tecnologia/2017/07/20/actualidad/1500554624_627767.html>
- Jenny, Hans. *Cymatics: A Study of Wave Phenomena and Vibration*. 1967. Maine: Macromedia Publishing, 2001.
- Kant, Immanuel. *Crítica del juicio*. 1790. Barcelona: Austral, 2013.
- Kármán, Theodore. *Über den Mechanismus des Widerstandes, den ein bewegter Körper in einer Flüssigkeit erfährt* [Sobre el mecanismo de resistencia que experimenta un cuerpo en movimiento en un líquido]. Alemania: Sociedad de Ciencias de Göttingen, 1911.
- Kauffman, Stuart Alan. *The Origins of Order: Self-Organization and Selection in Evolution*. Oxford: Oxford University Press, 1993.
- _____. *At Home in the Universe. The Search for Laws of Self-organization and Complexity*. Oxford: Oxford University Press, 1995.
- Lamarck, Jean-Baptiste. *Filosofía zoológica*. 1802. Madrid: Editorial La Oveja Roja, 2017.
- Li, Ming y Paul Vitányi. *An Introduction to Kolmogorov Complexity and its Applications*. Lausana: Springer Science & Business Media, 2009.
- Lim, Tee Tai y Timothy Bruce Nickels. “Head-on Collision of Coloured Vortex Rings at Re-1071”. *Nature* 357.6375 (1992): 225-227.
- Miramontes, Octavio. *Evolución, autoorganización y otros números del montón*. México: Editorial Centro de Ciencias de la Complejidad-Universidad Nacional Autónoma de México, 2009.
- Montilla, Adolfo Recober. “Sinergia e incremento de complejidad”. *Filosofia e História da Biologia* 16.1 (2021): 1-28. <<https://doi.org/10.11606/issn.2178-6224v16i1p1-28>>

- Prigogine, Ilyá e Isabelle Stengers. *Order out of Chaos: Man's New Dialogue with Nature*. New York: Bantam Books, 1984.
- Raven, John Carlyle. *Test de matrices progresivas escala avanzada*. Barcelona: Paidós Ibérica Sociedad Anónima, 2003.
- Schelling, Friedrich Wilhelm Joseph. *Escritos sobre filosofía de la naturaleza*. 1797. Madrid: Alianza, 1996.
- Schleicher, August. *Die Sprachen Europas in Systematischer Übersicht* [Las lenguas de Europa en una visión sistemática]. Bonn: H. B. König, 1850.
- Strogatz, Steven Henry. *Sync: The Emerging Science of Spontaneous Order*. París: Hachette Books, 2003.
- Teilhard de Chardin, Pierre. *El fenómeno humano*. 1955. Madrid: Taurus, 1967.